

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Estudi d'optimització energètica del centre de dades Mare Nostrum

MEMÒRIA

Autor: Débora González Sánchez
Director: Francisco Díaz González
Convocatòria: Gener 2018



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

En el present document es plantegen diverses alternatives amb l'objectiu de millorar la eficiència energètica dels centres de dades. Aquests tipus d'edificis contribueixen significativament al consum global del planeta, tant per la seva elevada densitat de demanda energètica, com pel ràpid i creixent desplegament arreu del món. Per a aquest estudi, s'adopta un cas d'estudi al voltant d'un centre de dades concret, com és l'anomenat Mare Nostrum (Barcelona, UPC).

Per això, aquest document conté la informació necessària per entendre què és un centre de dades, quines són les tipologies de centre de dades existents actualment, quines aplicacions se'ls hi pot donar i quins són els aspectes que es poden optimitzar que afecten directament al consum elèctric del centre de dades.

Els dos principals punts de millora són, per una banda, l'optimització del disseny del sistema elèctric i, per altra banda, l'optimització del disseny del sistema de refrigeració, al ser les dues àrees que suposen major consum. En quant al sistema elèctric, conté molts elements redundants existents per evitar que el centre de dades es pugui veure afectat en un possible tall del subministrament elèctric que fan que, ja sigui per sistemes de bateries o per un sistema de generació dièsel, el centre de dades segueixi funcionant amb una autonomia limitada suficient per suportar el tall en l'alimentació. En quant al sistema de refrigeració necessari per al correcte funcionament dels components electrònics, que han de romandre en unes condicions molt específiques de temperatura, té certes ineficiències degudes al sistema de control de les màquines frigorífiques, que tenen un consum molt elevat a causa de la gran dissipació de calor dels servidors.

S'efectuarà primerament un estudi d'alternatives que plantegin una solució dintre de les àrees de major consum (el sistema elèctric i el sistema de refrigeració) i, finalment, es realitzarà un estudi específic, tant tècnic com econòmic, d'aquella alternativa aplicada al centre de dades específic Mare Nostrum.

Es consideren concloents els resultats obtinguts perquè els objectius plantejats s'han assolit. S'ha aconseguit plantejar una proposta que millori l'eficiència energètica del centre de dades Mare Nostrum.

Sumari

RESUM	2
SUMARI	3
1. GLOSSARI	7
1.1. Abreviatures	7
1.2. Definicions	8
2. PREFACI	9
2.1. Origen del projecte	9
3. INTRODUCCIÓ	11
3.1. Objectius del projecte	11
3.2. Motivació	11
3.3. Abast del projecte	11
4. ESTAT DE L'ART: ELS CENTRES DE DADES	13
4.1. Tipologia de centres de dades	14
4.2. Aplicacions dels centres de dades	15
4.3. Disseny del sistema d'alimentació elèctrica	15
4.3.1. Subministrament elèctric de xarxa	16
4.3.2. Sistemes d'alimentació ininterrompuda	16
4.3.3. Grups electrògens	17
4.4. Disseny del sistema de refrigeració dels supercomputadors	18
4.4.1. Refrigeració per aire	18
4.4.2. Refrigeració per aire i aigua	19
4.4.3. Refrigeració per bany d'oli	21
4.5. Indicadors d'eficiència	21
5. CENTRE DE SUPERCOMPUTACIÓ MARE NOSTRUM	25
5.1. Disseny del sistema elèctric	26
5.1.1. Esquema elèctric	26
5.1.2. Sistemes d'alimentació ininterrompuda	27
5.1.2.1. Modes de funcionament	28
5.1.2.2. Característiques tècniques	31
5.2. Disseny del sistema de refrigeració	34
5.3. Potència contractada / consum energètic	35

5.4.	Eficiència	35
5.5.	Perfils horaris de consum	35
5.6.	Utilització del sistema dièsel	36
6.	PROPOSTES DE MILLORA AL CENTRE DE DADES MARE NOSTRUM	37
6.1.	Unitat d'emmagatzematge local de energia (LES).....	37
6.1.1.	Patents	40
6.2.	Substitució del grup electrogen per un banc de bateries.....	44
6.3.	Millora de l'eficiència del sistema de refrigeració	44
7.	DESENVOLUPAMENT DE L'ALTERNATIVA ESCOLLIDA	46
7.1.	Elecció de l'alternativa	46
7.2.	Descripció de l'alternativa seleccionada	47
7.3.	Plantejament de l'estudi.....	49
8.	ANÀLISI TÈCNIC	50
8.1.	Modelització dels elements del sistema	51
8.1.1.	Bloc Perfil de càrrega	52
8.1.2.	Bloc PSU.....	52
8.1.3.	Bloc Cable.....	55
8.1.4.	Bloc UPS.....	57
8.1.5.	Bloc Transformador	59
8.2.	Càlculs i resultats obtinguts.....	61
8.3.	Conclusions.....	65
9.	ANÀLISI ECONÒMIC	66
9.1.	Estalvi econòmic.....	66
9.2.	Model de costos	66
9.2.1.	Definició dels paràmetres del model.....	67
9.2.1.1.	Capacitat d'emmagatzematge de la bateria	68
9.2.1.2.	Capacitat de potència del sistema de conversió d'energia.....	68
9.2.1.3.	Cost específic per unitat de capacitat d'emmagatzematge d'energia ...	68
9.2.1.4.	Cost específic per unitat de capacitat de potència	69
9.2.1.5.	Cost específic fix d'operació i manteniment	70
9.2.1.6.	Cost específic de l'electricitat	70
9.2.1.7.	Hores en funcionament diàries i dies en funcionament anuals	70

9.2.1.8. Eficiència d'anada i tornada.....	70
9.2.1.9. Màxima profunditat de descàrrega	70
9.2.1.10. Horitzó del projecte.....	70
9.2.1.11. Taula de paràmetres	71
9.2.2. Resultats obtinguts.....	71
9.3. Conclusions.....	72
CONCLUSIONS	73
AGRAÏMENTS	75
BIBLIOGRAFIA	76
Referències bibliogràfiques	76

1. Glossari

1.1. Abreviatures

AC: Alternating Current (o corrent alterna CA)

BSC: Barcelona Supercomputing Center (centre nacional de supercomputació)

CA: Corrent Alterna

CC: Corrent Continu

CPD: Centres de Processament de Dades o centres de dades

DC: Direct Current (o corrent continu CC)

DCIM: Data Center Infrastructure Management

DOE: Department of Energy (departament d'energia)

ESS: Energy Save System (o mode d'estalvi energètic)

ICT: Information and Communication Technology sector (sector de la Tecnologia de la Informació)

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor (o transistor bipolar de porta aïllada)

IT: Information Technology (Tecnologia de la Informació TI)

JRC: Joint Research Centre (Centre Comú d'Investigació)

LCOE: Levelized Cost of Energy (Costos anivellats de l'energia)

LES: Local Energy Storage (o unitat d'emmagatzematge local d'energia)

PFC: Power Factor Correction (o correcció del factor de potència)

PI: Performance Indicator

PSU: Power Supply Unit (o font d'alimentació)

PUE: Power Usage Effectiveness (o efectivitat de l'ús de l'energia)

PWM: Pulse-width modulation (o regulació de l'amplada del pols)

SAI: sistema d'alimentació ininterrompuda

SPS: Stand-by Power Systems (Sistemes d'alimentació en estat d'espera)

TI: Tecnologia de la Informació

UPS: Uninterruptible Power Supply (sistema d'alimentació ininterrompuda SAI)

VRLA: Valve Regulated Lead-Acid battery (bateries d'àcid i plom regulades per vàlvula)

1.2. Definicions

CHILLERS: unitats refredadores de líquids.

NETWORKING: xarxa.

RACK: armari creat per contenir els servidors i altres equipaments actius.

2. Prefaci

2.1. Origen del projecte

Els centres de dades contribueixen de manera molt important al consum global del planeta, molt més que qualsevol altra sector de la indústria. En general, el sector de la Tecnologia de la Informació (IT) consumeix actualment un 7% d'electricitat mundial aproximadament i es preveu que aquest consum augmentarà fins a un 13% al 2030 [1]. Per altra banda, s'estima que els centres de dades representen el 1,4% del consum d'electricitat global [2] i, per aquesta raó, s'estan desenvolupant iniciatives que tenen per objectiu el control del consum d'aquests centres de dades com la *EU Code of Conduct for Data Centres*.

Paral·lelament, els centres de dades contaminen molt ja que, a part de l'energia que consumeixen de la xarxa elèctrica, que típicament prové de combustibles fòssils i va incorporant cada cop més les energies renovables, estan equipats amb grups electrògens que generen energia elèctrica a través d'un motor de combustió interna que pot ser de tipus dièsel (gasoil) o gasolina basats també en combustibles fòssils. Per aquesta raó, s'estima que els centres de dades tenen la petjada de carboni de més ràpid creixement de tot el sector de la Tecnologia de la Informació i la Comunicació o *Information and Communication Technology sector* (ICT) principalment a causa dels avenços tecnològics de la computació al núvol o del ràpid creixement de l'ús dels serveis d'Internet [3]. A més, es coneix que el ICT, que inclou els centres de dades, genera fins a un 2% de les emissions mundials de CO₂ segons el Centre Comú d'Investigació o *Joint Research Centre* (JRC) [3][4], molt més que la indústria de l'aviació a nivell mundial.

Conegudes les dues principals problemàtiques que presenten els centres de dades, que van íntimament lligades (consum i contaminació), coneguda també la seva importància en termes energètics a nivell global i amb la necessitat creixent d'evolucionar cap a una indústria cada cop més sostenible i respectuosa amb el medi ambient, sorgeix l'idea d'estudiar la arquitectura del sistema elèctric i de refrigeració d'un centre de dades real per tal de poder entendre el funcionament d'aquesta i poder analitzar si és possible la incorporació d'alguna millora en aquesta. Amb aquesta finalitat i degut als grans avenços que s'estan donant en l'àmbit de l'emmagatzematge d'energia elèctrica, es planteja l'aplicació de l'ús de sistemes de bateries actuals per tal de fer els centres de dades més "verds" a més de realitzar una recerca d'altres possibles propostes que puguin millorar energèticament l'elevat consum energètic.

El Mare Nostrum és el centre de supercomputació escollit per tal de dur a terme aquest estudi. Es tracta del supercomputador més emblemàtic i potent d'Espanya [5] i es troba a la

ciutat de Barcelona.

3. Introducció

3.1. Objectius del projecte

L'objectiu principal plantejat a l'hora de dur a terme aquest projecte és el de poder avaluar el sistema energètic actual d'un centre de dades real, per tal de proposar, d'entre les alternatives existents actualment al mercat o en vies de desenvolupament, una solució avançada que permeti millorar la gestió energètica i l'impacte mediambiental d'aquest centre de dades.

Per altra banda, es plantegen objectius secundaris com la recerca d'una solució que aportï millores, tant a nivell tècnic i de seguretat com a nivell econòmic, derivades de la substitució dels corresponents dispositius físics per les propostes que es plantegin.

3.2. Motivació

El treball que es presenta a continuació té com a motivació principal l'aplicació dels coneixements obtinguts al llarg de la carrera en quant a sistemes energètics, la recerca de coneixements desconeguts en aquest àmbit i l'estudi de noves tecnologies per fer el sistema energètic en general més respectuós amb el medi ambient.

3.3. Abast del projecte

La recerca d'una solució que permeti optimitzar energèticament el centre de dades Mare Nostrum es molt àmplia ja que, com a centre de dades, té moltes àrees o zones que poden ser objecte d'estudi. La millora de l'eficiència energètica en els centres de computació de dades principalment resideix en l'optimització del sistema de suport de l'alimentació elèctrica o l'optimització del sistema de refrigeració dels aparells, que han de romandre en unes condicions tèrmiques molt específiques per tal de que funcionin correctament tots els seus components electrònics. Partint d'això, i amb la necessitat de focalitzar l'estudi en una àrea específica, en aquest projecte s'estudiarà únicament una alternativa de millora energètica dintre del gran ventall de possibilitats que podrien existir. A més, donat que és impossible intentar trobar una solució a la ineficiència energètica dels centres de dades de tot el món, es decideix estudiar un centre de dades real amb dades i informació específica i veure si, estudiada la solució, aquesta es pot extrapolar als altres centres de dades.

Plantejats els objectius del projecte i amb la finalitat de poder assolir-los, es valora que l'abast d'aquest projecte va des de l'auditoria inicial fins a l'avaluació tècnic-econòmica de la

solució avançada que es plantejarà aplicada al centre de dades Mare Nostrum, mitjançant eines de simulació i de models de costos.

El projecte inclourà els següents punts, necessaris si es vol arribar a una solució final satisfactòria amb èxit:

- Estudi dels centres de dades en termes generals, del seu sistema de suport de l'alimentació elèctrica i del seu sistema de refrigeració.
- Estudi i anàlisi del sistema de suport de l'alimentació elèctrica i del sistema de refrigeració del centre de dades Mare Nostrum.
- Estudi de les alternatives existents actualment al mercat o de noves propostes que permetin millorar energèticament el centre de dades Mare Nostrum.
- Valoració de l'alternativa més adequada, que més s'ajusta als objectius del projecte.
- Realització d'un estudi tècnic de l'alternativa seleccionada mitjançant la utilització d'eines de simulació.
- Realització d'un estudi econòmic de la solució proposada aplicant els models de costos.
- Valoració dels resultats obtinguts.

4. Estat de l'art: Els centres de dades

Antigament, existien programes televisius a hores determinades i amb una quantitat molt més limitada de canals que la que es té actualment, els documents s'escriuen en paper amb alguna copia (si era necessària), les trucades telefòniques es realitzaven des de telèfons fixes i, fins i tot, s'utilitzaven telèfons mòbil però únicament per realitzar trucades. No obstant això, al començar Internet, la banda ampla, els telèfons intel·ligents i altres tecnologies, la gent va començar a estar contínuament connectada a la xarxa transferint informació d'un lloc a un altre.

Degut al creixement de la necessitat d'emmagatzemar grans quantitats d'informació que s'ha anat desenvolupant durant les últimes dècades, com es mostra a la Figura 4.1, va sorgir la necessitat de tenir un equipament de xarxa i ordinadors unificats que poguessin donar resposta a aquestes peticions i donar servei sense problemes.

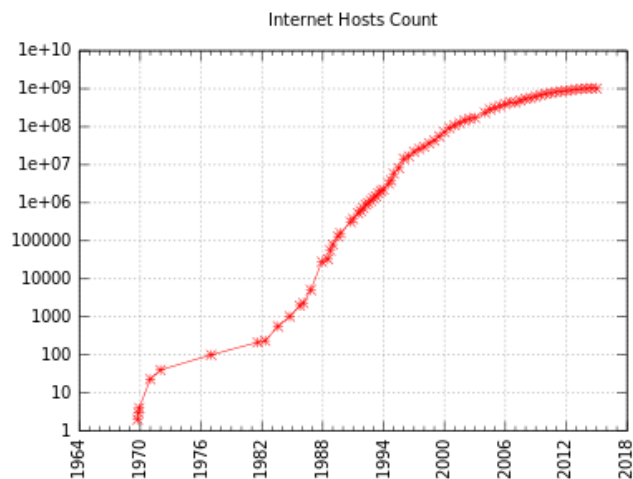


Figura 4.1. Evolució de la quantitat de servidors d'Internet des del 1964 fins a l'actualitat.¹

Els centres de dades o centres de processament de dades (CPD) poden definir-se com ubicacions de grans dimensions, que poden ser des de grans sales a conjunts d'edificis, destinades a contenir els equips informàtics, amb una arquitectura específica, necessaris per al processament, tractament i emmagatzematge de la informació per a la qual han estat dimensionats. En els inicis, un centre de dades potser contenia un únic ordinador, però, a mesura que l'equipament es feia més petit i econòmic, es van començar a ajuntar més servidors per augmentar la potència.

¹ Font: <https://www.revolvvy.com/>

Degut al gran impacte que suposaria un incorrecte funcionament d'aquests, a causa de la informació que processen, comuniquen o emmagatzemen, són sales especials equipades amb mecanismes de control elèctric, ambiental i d'extinció d'incendis. Els CPD's pretenen, en tot moment, oferir un servei ràpid, fiable i al que no li puguin afectar les possibles interrupcions provocades per averies als equips, averies de comunicació, talls en el subministrament del corrent, congestió de la xarxa i altres problemes que han de solucionar de manera pràcticament instantània.

En els últims anys, la gestió eficient dels centres de dades ha anat guanyant importància a mesura que les empreses han posat més èmfasi a l'ús de les tecnologies de la informació. Principalment, existeixen dues branques per atacar el problema de la ineficiència energètica: el sistema de suport elèctric i el sistema de refrigeració.

4.1. Tipologia de centres de dades

Exposat què és un centre de dades, cal seleccionar el criteri per tal de categoritzar-los. Tot i que es poden realitzar diverses classificacions dels centres de dades, segons el seu nivell de qualitat, les seves dimensions o l'ús que se'ls hi dona, la indústria tecnologia els classifica en 4 tipus segons el nivell de redundància dels components que suporten el centre de dades. Aquesta classificació ideada pel *Uptime Institute* plasmada al estàndard ANSI/TIA-942 [6] és la següent:

- **TIER I:** fa referència a un centre de dades bàsic sense redundàncies en els seus components vitals (refrigeració i subministrament elèctric) que perdria la seva capacitat d'operació davant una averia en qualsevol d'ells o el qualsevol operació de manteniment (que derivaria en un temps de no disponibilitat de la infraestructura). Aquest centre de dades pot o no tenir terres elevats, generadors auxiliars o UPS.
- **TIER II:** fa referència a un centre de dades amb redundàncies en algun dels seus elements vitals, com la refrigeració, però que consta d'un únic camí de subministrament elèctric. Es tracta d'un centre de dades amb terres elevats, amb generadors auxiliars o UPS que estan connectats a una única línia de distribució elèctrica i de refrigeració. A diferència dels centre de dades amb TIER I, aquestes instal·lacions tenen un cert grau de tolerància a averies i també permeten certes operacions de manteniment "on-line".
- **TIER III:** fa referència a una tipologia de centre de dades que a més de complir amb les especificacions de TIER II, té nivells importants de tolerància a averies a que té tots els equipaments bàsics redundats, inclòs el subministrament elèctric (té connectades múltiples línies de distribució elèctrica i de refrigeració per únicament una en funcionament actiu). Tots els servidors consten de doble font i, en principi, no

són necessàries les parades per operacions de manteniment bàsiques.

- **TIER IV:** fa referència a centres de dades que a més de complir amb les especificacions de TIER III, poden suportar averies a qualsevol dels seus components que inhabilitin una línia (subministrament, refrigeració), és a dir, hi haurà connectades múltiples línies de distribució elèctrica i de refrigeració cadascuna amb múltiples components redundants.

4.2. Aplicacions dels centres de dades

Els centres de dades es poden haver creat per aplicacions molt diverses com per a donar suport a un petit projecte, fer funcionar un supercomputador, donar resposta a les peticions dels clients d'una determinada empresa o emmagatzemar grans quantitats d'informació.

Com s'ha comentat amb anterioritat, degut a la gran necessitat greixen d'ús de dades, pràcticament qualsevol corporació o empresa necessita un centre de dades o un accés a part d'un d'una altra companyia. Hi ha empreses suficientment grans i riques com per tenir un centre de dades propi, altres contracten espai d'emmagatzematge i infraestructura a altres corporacions i altres utilitzen serveis públics basats en el núvol mitjançant grans empreses com *Google* o *Microsoft* (que tenen CPD propis).

Per altra banda, existeixen necessitats de, no només emmagatzemar informació, sinó de treballar amb ella per tal de realitzar simulacions que permetin predir comportaments futurs a partir de l'anàlisi de dades conegudes, aquest seria el cas d'un centre de dades que dona suport a un petit projecte o d'un supercomputador (si es volen realitzar simulacions que requereixen de més potencia).

4.3. Disseny del sistema d'alimentació elèctrica

L'energia elèctrica és la clau de totes les operacions que es duen a terme als centres de dades i, per aquesta raó, és molt important que aquesta sigui fiable per tal que tota la infraestructura pugui funcionar. En conseqüència, amb la connexió a la xarxa elèctrica convencional no és suficient, sinó que es imprescindible disposar d'equips de suport que tinguin la capacitat d'aportar l'energia elèctrica necessària per al correcte funcionament del CPD en cas de tall en el subministrament elèctric. Per aquesta raó, els sistemes d'alimentació ininterrompuda (SAI) basats en bateries (sistemes d'emmagatzematge d'energia) i els generadors elèctrics son una part fonamental per assegurar el correcte servei del sistema en cas de talls.

4.3.1. Subministrament elèctric de xarxa

L'electricitat que subministra la xarxa elèctrica es tracta d'un corrent altern (AC) representat com una senyal sinusoidal que varia 50 cicles per segon, és a dir, amb una freqüència de 50 Hz. Aquesta, pot patir certs canvis en la seva amplitud, forma, simetria, freqüència o, inclús, pot patir oscil·lacions i provocar alteracions al sistema que alimenta. Les principals alteracions del subministrament elèctric són les mostrades a la Figura 4.2.

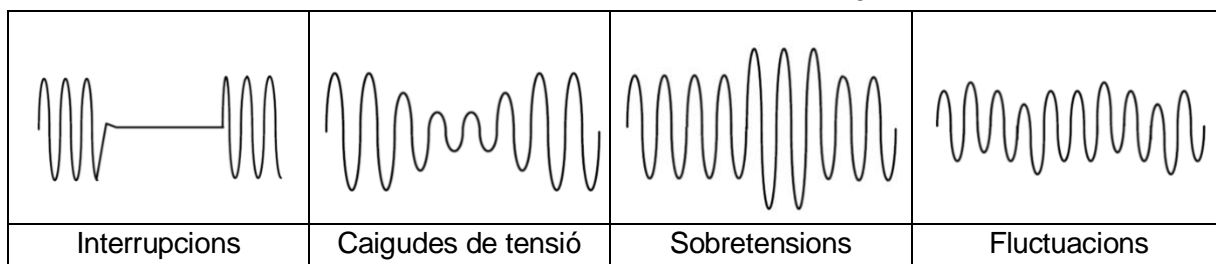


Figura 4.2. Alteracions del subministrament elèctric de la xarxa.

Aquest tipus d'alteracions externes en el subministrament elèctric de la xarxa amb respecte a l'ideal poden provocar danys en els receptors, en aquest cas els servidors. Per això és important disposar de mecanismes de control que permetin controlar i corregir aquestes alteracions que existeixen de manera inherent a la xarxa elèctrica.

4.3.2. Sistemes d'alimentació ininterrompuda

Un sistema d'alimentació ininterrompuda (SAI) o *Uninterruptible Power Supply* (UPS) és un dispositiu que integra un circuit especial que permet alimentar un joc de bateries recarregables internes a la vegada que subministra energia elèctrica al sistema. Existeixen determinats tipus de SAI's, però tots tenen la funció principal de proporcionar energia elèctrica a un equip en cas de tall en el subministrament elèctric posant en funcionament les bateries i proporcionant energia a la càrrega, durant un període de temps limitat (uns minuts), fins que arranca el sistema d'alimentació de reserva (grups electrògens) o s'estableix el subministrament d'electricitat principal. Paral·lelament, els SAI's també poden millorar la qualitat de l'energia subministrada, depurant l'energia provinent de la xarxa elèctrica i rectificant les principals alteracions que poden produir-se (Figura 4.2) per tal de protegir els sistemes electrònics. Existeixen bàsicament dos tipus de SAI's:

- SPS (*Stand-by Power Systems* / Sistemes d'alimentació en estat d'espera) o UPS off-line: es tracta d'un sistema particular de sistemes d'alimentació ininterrompuda que s'activa quan detecta una averia en el subministrament d'energia elèctrica. Normalment la càrrega està alimentada per la xarxa convencional i en el cas de provocar-se qualsevol incidència en aquesta línia, entra en funcionament la bateria que prèviament s'ha carregat realitzant una transformació de corrent alterna AC a corrent contínua DC per carregar la bateria i posteriorment transformant el corrent

continu que subministra la bateria a corrent alterna. En aquest sistema, l'eficiència és molt alta ja que el carregador no està contínuament treballant, els costos d'inversió i d'instal·lació són baixos i la capacitat de maneig del carregador es redueix dràsticament.

- UPS on-line: es tracta d'un sistema d'alimentació ininterrompuda que es troba constantment alimentant l'equip tot i que no existeix cap tipus d'averia en el sistema de subministrament i, a la vegada, recarrega la bateria. D'aquesta manera, constantment s'està realitzant la transformació AC/DC per carregar la bateria i la transformació DC/AC per alimentar la càrrega. En aquest sistema, el subministrament principal i la càrrega estan aïllats, la qualitat de la tensió de la càrrega queda lliure de distorsions ja que l'inversor està sempre connectat, el voltatge està millor regulat i no existeix cap tipus de pertorbació en el corrent quan falla la xarxa ja que el temps de transició és pràcticament nul.

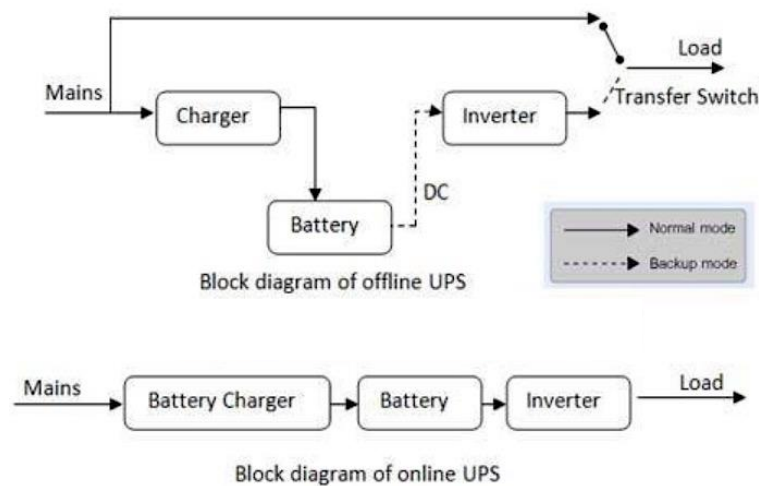


Figura 4.3. Esquemes elèctrics de UPS off-line i UPS on-line.²

4.3.3. Grups electrògens

Els CPD han de disposar de plantes d'emergència o grups electrògens que permeten allargar l'autonomia de les bateries, que donen un marge de temps per tal que aquests s'encenguin, proporcionant energia elèctrica al sistema. Aquesta energia elèctrica s'obté mitjançant un motor de combustió interna, típicament dièsel, que genera energia tèrmica, aquesta es converteix en mecànica a través del moviment dels components mòbils interns i, finalment, mitjançant un alternador es converteix en energia elèctrica.

² Font: <https://www.quora.com/What-is-the-difference-between-online-ups-and-offline-ups>

4.4. Disseny del sistema de refrigeració dels supercomputadors

Els CPD contenen una gran quantitat de components electrònics que han d'estar en unes condicions tèrmiques molt estrictes per al seu correcte funcionament i en unes condicions de neteja impecables ja que la brutícia i les partícules de pols poden provocar el sobreescalfament dels equips impedit el flux d'aire i el mal funcionament d'aquests.

Actualment, existeixen tres tipus de refrigeració per als centres de dades: la refrigeració per aire, per aire i aigua i per bany d'oli.

4.4.1. Refrigeració per aire

Les parts d'un supercomputador estan organitzades en mòduls que formen passadissos sobre un terra elevat. Per aquest cas de refrigeració, els mòduls contenen ventiladors que aspiren aire de l'ambient per tal de refredar l'interior del mòdul on estan continguts els nodes (cada node és com la placa base d'un ordinador) i l'expulsen calent. El cicle que segueix aquest aire és el següent:

1. S'envia aire refrigerat sota el terra elevat que està perforat creant un gradient de pressió amb l'aire de sobre el terra que fa que l'aire refredat entri a la sala de supercomputació.
2. L'aire fred entra als mòduls on hi ha els components electrònics i hi circula per mitjà dels ventiladors continguts a les cabines.
3. L'aire que surt calent dels mòduls puja cap a la part superior de la sala al ser menys dens.
4. Es recull l'aire calent de la part superior de la sala per tornar a refrigerar-lo.

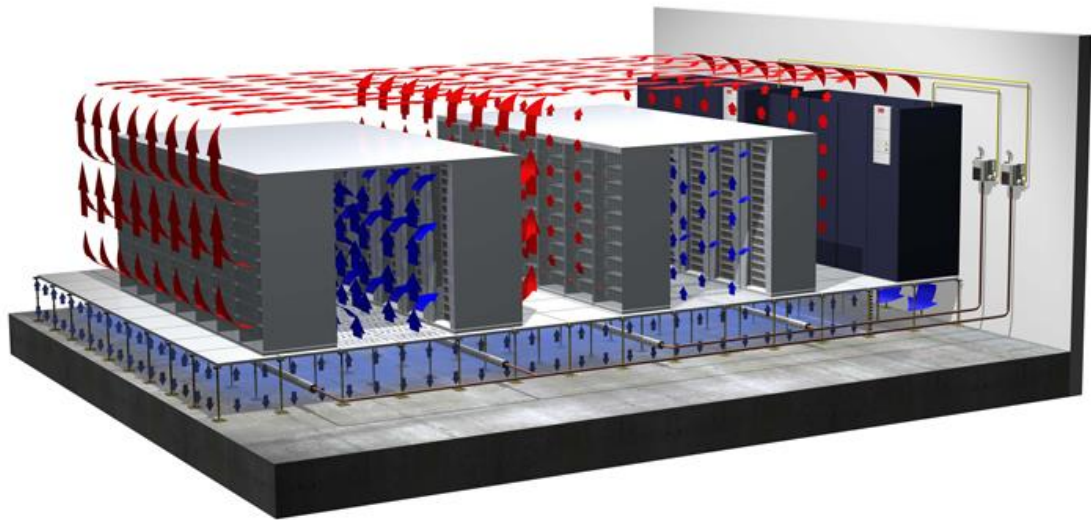


Figura 4.4. Sistemes de refrigeració per aire.³

Com a resultat d'aquest sistema de refrigeració es creen passadissos freds, on els mòduls agafen l'aire per refredar-se, i passadissos calents on és expulsat l'aire que els mòduls han fet servir per a la seva refrigeració com es pot observar a la Figura 4.4.

Aquesta tecnologia de refrigeració presenta principalment dos inconvenients: que la diferència de temperatura entre passadissos ha d'estar minuciosament controlada per tal que no hi hagi cap punt que assoleixi temperatures superiors a les de treball i que és un sistema poc eficient respecte d'altres ja que l'aire no és dels medis més eficients per dissipar calor i és necessària una gran quantitat d'energia per refrigerar la sala.

4.4.2. Refrigeració per aire i aigua

Aquest sistema de refrigeració és més complex que l'anterior i es divideix en 3 circuits principals: circuit primari, circuit secundari i circuit terciari.

Al circuit primari es realitza el refredament de l'aigua que posteriorment refrigerarà la sala de supercomputació. Per tal de refredar l'aigua, que circularà per un circuit tancat, s'utilitzen màquines anomenades *chillers* o unitats refredadores de líquids. Aquestes absorbeixen calor de l'aigua del circuit secundari mentre passa per intercanviadors de calor que aconseguixen reduir la temperatura de l'aigua fins la desitjada (Figura 4.6).

Per tal que el cicle de refrigeració de l'aigua pugui ser continu, la calor absorbida pels chillers s'ha de dissipar aplicant un cicle termodinàmic de refrigeració (Figura 4.5) per compressió

³ Font: <http://www.socored.es/refrigeracion-cpd/>

d'un refrigerant que absorbeix la calor de l'aigua en l'intercanviador.

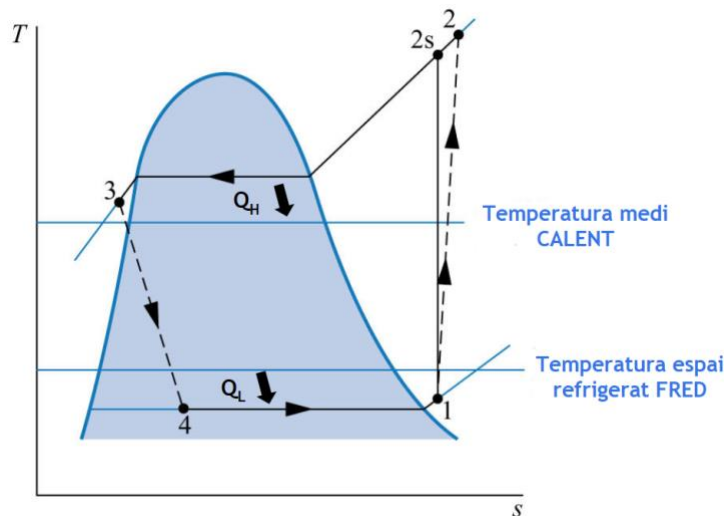


Figura 4.5. Cicle termodinàmic de refrigeració per compressió.

El cicle de refrigeració mostrat, consta de les següents etapes:

4→1 El fluid refrigerant absorbeix calor de l'aigua (Q_L) a l'intercanviador de calor (evaporador). En aquesta fase es produeix el refredament de l'aigua.

1→2 El refrigerant en estat vapor es comprimeix pel pas pel compressor.

2→3 El refrigerant passa per un radiador (condensador) on intercanvia calor (Q_H) amb aire a temperatura ambient que és impulsat per la sala on està contingut per uns ventiladors. A causa de l'intercanvi de calor, el refrigerant torna a estat líquid. En aquest alliberament de calor, al produir-se en un lloc diferent a l'original (refredament de l'aigua al evaporador), s'aconsegueix un efecte de "moviment de calor" del procés a l'ambient.

3→4 En aquesta etapa es retorna el refrigerant a la pressió de l'etapa 1 per mitjà d'una vàlvula per tal d'acabar de rebaixar la temperatura fins la necessària al evaporador.

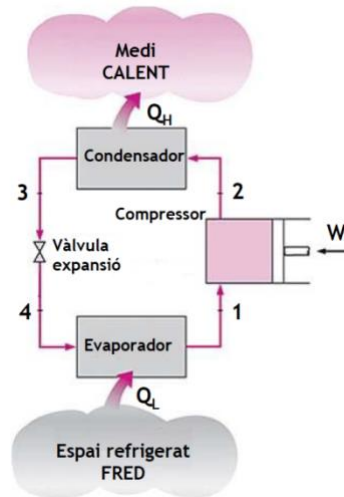


Figura 4.6. Etapes del cicle de refrigeració de l'aigua als chillers.

El circuit secundari està conformat per totes les canonades que connecten els *chillers*, on es produeix el refredament de l'aigua, amb la sala a refredar que conté tots els components electrònics que tanta calor dissipen.

Finalment, el circuit terciari és aquell circuit tancat que circula per l'interior de la sala de supercomputació amb aigua que s'ha refredat en una cambra de mescla amb aigua provinent del circuit secundari. Aquesta principalment realitza dues funcions: per una banda es fa circular aigua freda pels compartiments ubicats a les portes posteriors dels mòduls (que són les que més calor dissipen) i, per altra banda, es refrigera l'aire amb aquesta aigua freda seguint el procediment de la refrigeració per aire explicat anteriorment.

4.4.3. Refrigeració per bany d'oli

Aquesta tecnologia és la més recent de totes tres. Es tracta d'un sistema de refrigeració en vies de desenvolupament ja que només s'ha provat en prototips de CPD's. La innovació està en la idea de tenir submergits els equips o nodes del supercomputador en oli no conductor fent que aquest dissipï molt millor el calor generat en les operacions de càlcul o simulació del supercomputador.

La refrigeració per any d'oli pretén fer els centres de dades més eficients per tal de fer més simulacions amb el mateix consum energètic i poder reduir la petjada de carboni, sent més respectuosos amb el medi ambient.

4.5. Indicadors d'eficiència

Sent l'eficiència un dels principals problemes dels centres de dades i el que es vol intentar

millorar, interessa conèixer quins són aquells indicadors o mètriques que avaluen l'eficiència elèctrica i de climatització dels centres de dades.

L'optimització del cost d'operació dels CPD's és d'importància creixent degut a l'enorme pes que suposa el cost de l'energia i, per això, és imprescindible maximitzar l'eficiència de les instal·lacions. En relació a això, s'utilitza com indicador d'eficiència el PUE (*Power Usage Effectiveness* o efectivitat de l'ús de l'energia), que ha esdevingut la mètrica preferida actualment per a mesurar l'eficiència energètica per centres de dades.

El PUE relaciona l'energia utilitzada en computació amb respecte a l'energia total consumida per les instal·lacions.

$$PUE = \frac{\text{Consum total d'energia del centre de dades}}{\text{Consum d'energia de la infraestructura TI}} \quad (\text{Eq. 4.1.})$$

Per una banda, el consum total d'energia del centre de dades correspondria al total de la factura de la llum de la instal·lació, és a dir, inclou servidors, màquines de refrigeració, il·luminació, etc. Per altra banda, el consum de l'energia de la infraestructura TI correspon al consum d'energia per part de l'equipament TI (servidors, equips de *networking*, etc.). Per definició aquest valor serà sempre major o igual a la unitat on interessa que sigui el més proper possible a la unitat (centre de dades ideal), per tal de que sigui més eficient ja que significaria que tota la potència consumida de la xarxa elèctrica arriba a les càrregues sense pèrdues o sense cap necessitat de refrigeració.

Per tenir una referència, segons el departament d'energia dels Estats Units (DOE) el PUE mitjà per centres de dades és de 1.75 [13] i una referència de distribució de consums elèctrics pot ser la mostrada a la Figura 4.7.

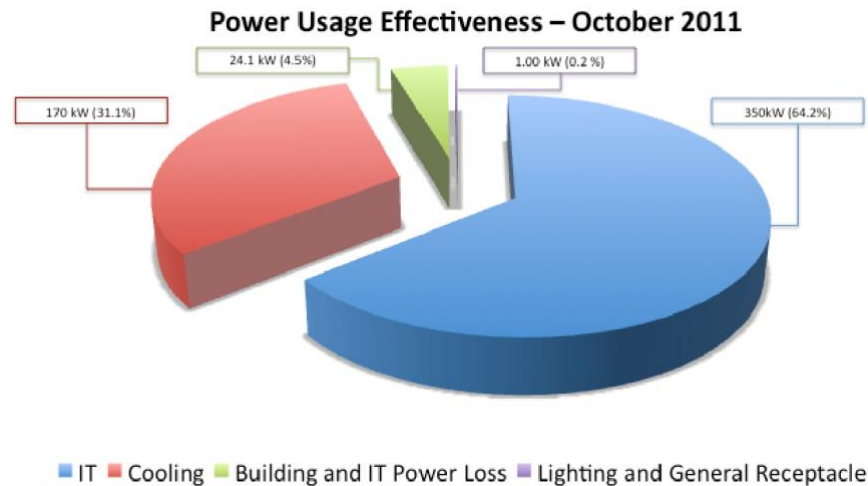


Figura 4.7. Distribució de consum d'un centre de dades real pel mes d'Octubre del 2011.⁴

Aquest indicador, però, no és complet ja que no considera el comportament de les instal·lacions enfront a canvis de temperatura, manteniment, etc. Per això, *The Green Grid* crea un nou indicador anomenat PI (*Performance Indicator*) [6] que integra variables com la capacitat, la sostenibilitat i la disponibilitat del centre de dades.

Les mesures PI es basen en tres mètriques:

- **Índex PUE:** que avalua l'eficiència energètica del centre de dades.
- **Conformitat tèrmica del TI:** que avalua com d'eficientment es refrigera l'equip durant les operacions de funcionament normals.
- **Resistència tèrmica TI:** que avalua l'eficiència amb la que l'equip es refreda en períodes de treballs de manteniment o averies.

L'indicador PI aleshores pren cadascuna d'aquestes mesures de forma individual i determina com afecta un canvi d'una mesura a les altres donant com a resultat un dels quatre nivells possibles de PI. Per saber com millorar l'eficiència energètica del centre de dades s'han de monitoritzar aquests paràmetres de forma regular i aquests proporcionaran informació sobre les causes que originen la seva variació. A més, no es pot únicament observar, sinó que es poden realitzar prediccions de comportament de les instal·lacions davant determinades situacions. Un exemple seria el mostrat a la Figura 4.8. en què es pot observar el nivell actual de cada un dels tres paràmetres que defineixen el indicador PI i també el nivell futur a un cert nivell de càrrega.

⁴ Font: <https://commons.lbl.gov/pages/viewpage.action?pagelId=77826981>

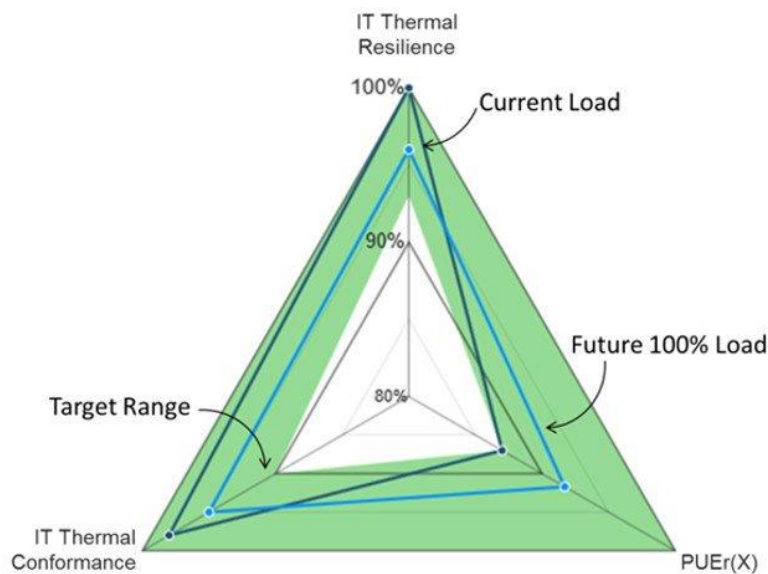


Figura 4.8. Exemple de visualització de l'indicador PI per un centre de dades.⁵

Els quatre nivells existents del indicador PI són:

- **Nivell 1:** és el més bàsic. Són necessaris sensors de temperatura ubicats als *racks* o armaris que contenen els servidors (com a mínim 3 per *racks*). És un nivell que únicament avalua l'estat actual.
- **Nivell 2:** aquest també és un indicador que es basa en mesures però, en aquest cas, en cada servidor. Són necessaris sensors a cada servidor i un sistema de monitorització o DCIM que pugui interpretar les mesures.
- **Nivell 3:** es creen models per tal de simular els possibles futurs estats i tenir una idea de com es pot comportar la instal·lació enfront els canvis.
- **Nivell 4:** és el més avançat ja que pot fer prediccions més precises de comportaments futurs. Es basa en simulacions 3D afegides als estats actuals. És necessari un calibrat amb tantes mesures de temperatura com sigui possible i un software que operi amb elles.

⁵ Font: <https://www.cic.es/eficiencia-energetica-en-datacenter-metricas-e-indicadores/>

5. Centre de supercomputació Mare Nostrum

El centre nacional de supercomputació és un centre de dades destinat a donar suport al superordinador més emblemàtic i més potent d'Espanya ubicat a la ciutat de Barcelona (Figura 5.1). Mare Nostrum és el nom genèric que el centre nacional de supercomputació o *Barcelona Supercomputing Center* (BSC) utilitza per referir-se a les diverses actualitzacions que s'han realitzat al llarg de la història al seu supercomputador, quatre versions fins a l'actualitat, l'última instal·lada el juny del 2017.



Figura 5.1. Imatge del supercomputador Mare Nostrum.⁶

Un supercomputador o superordinador és una suma de molts ordinadors que, treballant de forma paral·lela connectats entre sí, poden multiplicar-ne la seva potència. D'entre les diverses aplicacions que se li pot donar a un centre de dades, aquest en concret està plenament dedicat a generar coneixement utilitzant-se pràcticament en totes les disciplines científiques, des de l'astrofísica o la física de materials, passant per la biomedicina i fins a l'enginyeria i la indústria. Es tracta del tercer pilar de la ciència ja que els anàlisis científics avançats necessiten computació d'altres prestacions per discriminar i seleccionar quin dels milions de dades que es generen són importants per tal d'obtenir-ne coneixement. Alguns exemples de les simulacions que es poden realitzar gràcies a la supercomputació són la recopilació de dades del clima passat i actual per tal de predir el clima futur, l'estudi del sol i del clima espacial, la simulació de com un tsunami pot afectar una determinada costa o ciutat, entre d'altres.

⁶ Font: <https://www.bsc.es/marenostrum/marenostrum>

5.1. Disseny del sistema elèctric

5.1.1. Esquema elèctric

Com es pot observar a la Figura 5.2., l'esquema elèctric del *Barcelona Supercomputing Center* facilitat per un dels seus tècnics és d'una arquitectura complexa que a continuació s'explicarà. Aquest esquema intenta mostrar el camí que segueix l'electricitat des de que arriba per la xarxa fins que es condueix fins cadascuna de les càrregues, que poden ser servidors, sistemes de refrigeració o inclús serveis auxiliars com il·luminació, alarmes o sistemes de seguretat.

Com ja s'ha comentat, un centre de dades és més fiable quantes més redundàncies té i com més línies existeixen que poden alimentar a la mateixa càrrega. Com es pot observar a l'esquema elèctric mostrat, existeixen tres transformadors T1, T2 i T3, sent T2 un transformador igual que T1 que està de reserva per si alguna incidència es produís en T1.

Del primer transformador T1 en surten totes les càrregues corresponents als racks de còmput (càlcul). A més, hi ha una connexió al quadre 8 on està també connectat el generador d'emergència (GE) i el transformador T3. Sortint d'aquest quadre de commutació 8, es troben connectats els *racks* d'emmagatzematge, les torres de refrigeració, els *chillers* (màquines de refrigeració) i tots els sistemes auxiliars com alarmes, enllumenat, entre d'altres.

Cal comentar també que, tot que no estiguin explícitament indicats com a elements, el quadre 2 té una connexió a un UPS (UPSA) i el quadre 6 té una altra connexió a un UPS (UPSB).

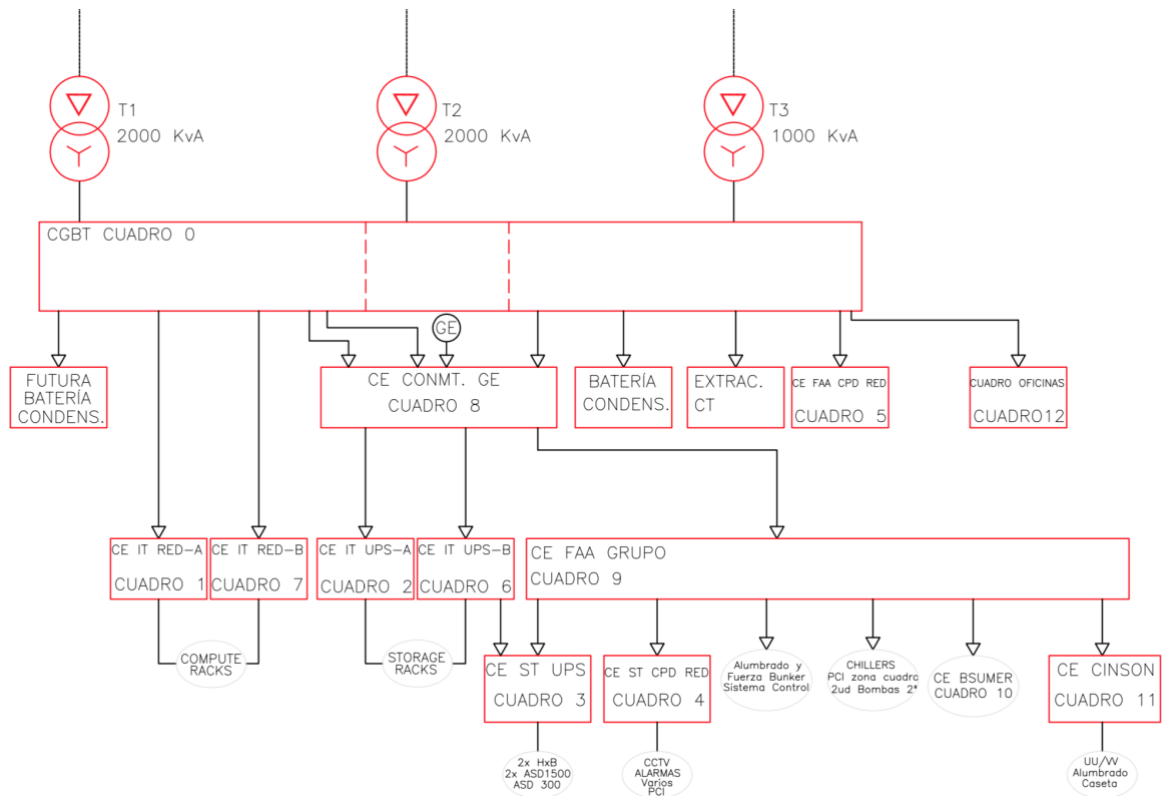


Figura 5.2. Esquema general sistema elèctric del Barcelona Supercomputing Center.⁷

5.1.2. Sistemes d'alimentació ininterrompuda

Com s'ha comentat amb anterioritat, en la gran majoria de centres de dades és necessari l'ús de sistemes d'alimentació ininterrompuda per tal de poder oferir una alimentació elèctrica sense interrupcions davant els petits talls del subministrament elèctric provinent de la xarxa que es puguin produir. En el centre de dades Mare Nostrum, disposen de 2 SAI's de 120kVA i 12 minuts d'autonomia que alimenten als racks de discos i als racks CTE de comunicacions (quadres 2 i 6 de la Figura 5.2) al ser les càrregues crítiques del centre de dades.

Els SAI de Eaton 93PM (Figura 5.3), que és l'utilitzat específicament, és un sistema trifàsic, de doble conversió, sense transformadors i de servei continu que subministra alimentació AC adaptable i ininterrompuda a la càrrega per a protegir-la d'avaries de l'alimentació. Aquest sistema, monitoritza de manera contínua l'electricitat d'entrada, eliminant les possibles sobretensions, descàrregues elèctriques, caigudes de tensió i altres possibles irregularitats existents de manera inherent en l'alimentació de la xarxa elèctrica.

⁷ Font: Imatge cortesia de l'equip tècnic de manteniment del Barcelona Supercomputing Center.



Figura 5.3. Imatge del SAI de Eaton 93PM.⁸

5.1.2.1. Modes de funcionament

Amb el SAI funcionant amb normalitat, existeixen dos possibles modes de funcionament. Per una banda el mode de funcionament de *Doble Conversió* que s'observa a la Figura 5.4. on l'alimentació d'entrada trifàsica AC es converteix en DC mitjançant un convertidor multinivell amb dispositius IGBT que generen una tensió DC regulada per l'inversor.

El convertidor de la bateria deriva electricitat des de la sortida DC del rectificador proporcionant així corrent regulada de càrrega per a la bateria que sempre està connectada al SAI i preparada per alimentar a l'inversor si l'entrada de la xarxa elèctrica deixés d'estar disponible.

L'inversor genera una sortida de AC trifàsica per a la càrrega crítica. Aquest, deriva l'alimentació DC regulada des del rectificador i utilitza una tecnologia de convertidor multinivell amb dispositius IGBT i amb regulació de l'amplada del pols (PWM) per generar una sortida AC regulada i filtrada.

⁸ Font:

<http://powerquality.eaton.com/Productsservices/BackupPowerUPS/93PM.aspx?cx=97&GUID=B1BB A3F1-C058-4E90-AA18-28F485ED76C3>

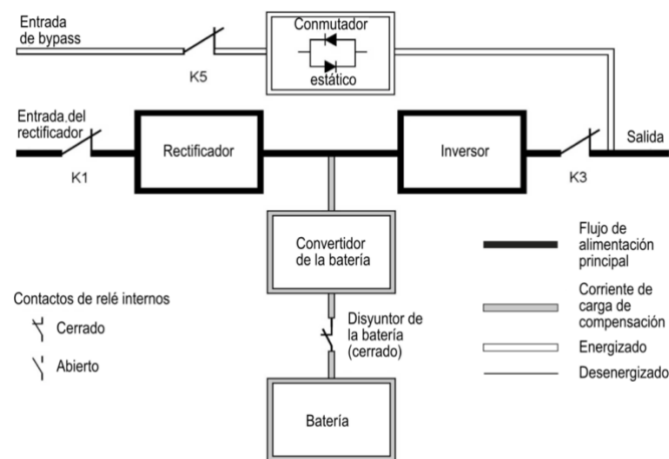


Figura 5.4. Ruta de corrent a través del SAI en mode doble conversió.⁹

En el cas que el subministrament d'alimentació AC de la xarxa elèctrica quedés interromput o quedés fora del rang especificat, el SAI passaria automàticament al mode *Bateria* per alimentar la càrrega crítica sense interrupcions com s'observa a la Figura 5.5. En el moment que la alimentació de la xarxa elèctrica tornés a funcionar amb normalitat, el SAI tornaria automàticament al mode de doble conversió.

Amb el mode *Bateria*, la bateria proporciona alimentació DC d'emergència que l'inversor converteix en alimentació de sortida regulada. En el cas de que la alimentació d'entrada no es restaurés o no es trobés dintre dels rangs tolerables necessaris per al funcionament normal, la bateria es descarregaria fins arribar a un nivell de tensió de DC que no permet que la sortida del inversor pugui seguir alimentant a les càrregues connectades.

⁹ Font: Catàleg del fabricant del SAI de Eaton 93PM.

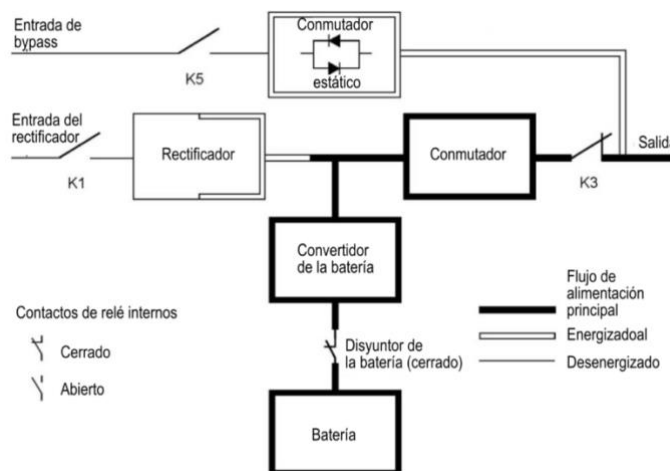


Figura 5.5. Ruta de corrent a través del SAI en mode bateria.¹⁰

Finalment, existeix el mode *Energy Save System* o *ESS* en el que es proporciona corrent de la xarxa elèctrica directament a la càrrega, com es mostra a la Figura 5.6., sempre que aquesta es troba en dintre d'uns límits acceptables de tensió i freqüència. En aquest mode de funcionament també és proporciona protecció contra sobretensions i algun filtrat, per tal d'assegurar que l'alimentació que s'entrega a la càrrega és neta. En el possible cas de detectar alguna pertorbació en l'alimentació d'entrada, el SAI passaria directament al mode de *Doble conversió* i, en cas de detectar una averia de la xarxa elèctrica es passaria al mode *Bateria*.

Amb aquest mode, el SAI funciona com un sistema d'estalvi d'energia d'alta eficiència proporcionant protecció enfront a sobretensions i assegurant una entrega d'energia neta.

¹⁰ Font: Catàleg del fabricant del SAI de Eaton 93PM.

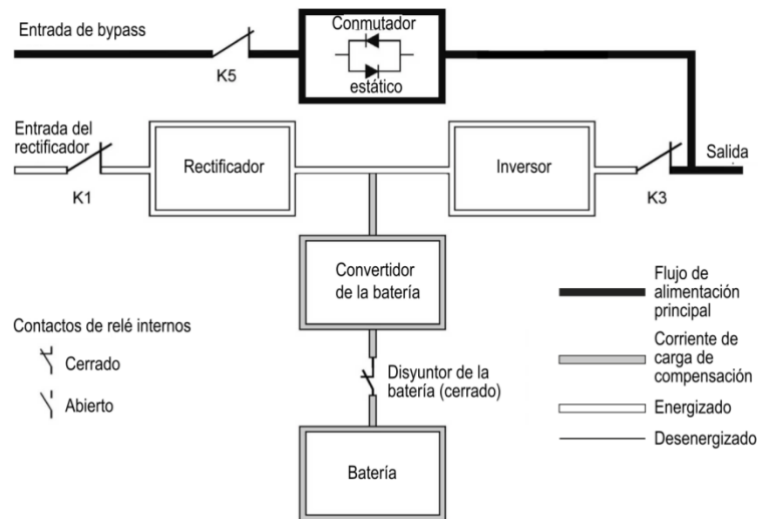


Figura 5.6. Ruta de corrent a través del SAI en mode Energy Save System.¹¹

5.1.2.2. Característiques tècniques

A continuació es detallen aspectes tècnics del SAI d'interès per als propers càlculs que es poden realitzar. En primer lloc, a la Figura 5.7. es detallen les característiques tècniques a l'entrada del SAI i, a continuació a la Figura 5.8. es detallen les característiques tècniques a la sortida del SAI.

¹¹ Font: Catàleg del fabricant del SAI de Eaton 93PM.

Tensión de entrada nominal	220/380 V; 230/400 V; 240/415 V
Tolerancia de tensión, (entrada del rectificador)	230 V -15% / +20%
Tolerancia de tensión, (entrada de bypass)	230 V -15% / +10%
Frecuencia de entrada nominal	50 ó 60 Hz, configurable por el usuario
Tolerancia de frecuencia	40 a 72 Hz
Número de fases de entrada, (entrada del rectificador)	Trifásico + neutro
Número de fases de entrada, (entrada de bypass)	Trifásico + neutro
Factor de potencia de entrada	0,99
Corriente de entrada de red nominal	Consulte la <i>Tabla 3-7: Corriente nominal y máxima para potencia y tensión nominales</i> en la página 32.
Corriente de entrada de red máxima	
Distorsión de la corriente de entrada a la corriente de entrada nominal, iTHD	30 kW: < 4,5 % 40-200 kW: < 3 %
Subida del rectificador, inicio del rectificador y paso de carga	10 A/s (predeterminado), configurable. Mín. 1A/s
Protección de retroalimentación	Sí, para líneas de rectificador y bypass

Figura 5.7. Característiques tècniques a l'entrada del SAI.¹²

¹² Font: Catàleg del fabricant del SAI de Eaton 93PM.

Número de fases de salida	Trifásico + neutro
Tensión de salida nominal	220/380 V; 230/400 V; 240/415 V, configurable
Distorsión de armónicos de la tensión total	< 1 %
Carga 100% lineal	< 5 %
Carga 100% no lineal	
Frecuencia de salida nominal	50 o 60 Hz, configurable
Variación de frecuencia de salida	± 0,1 Hz
Tasa de respuesta	1 Hz/s
Capacidad de sobrecarga a temperatura ambiente de 40 °C (en el inversor)	10 min 102-110% de carga 60 s 111-125% de carga 10 s 126-150% de carga 300 ms > 150% de carga
Capacidad de sobrecarga a temperatura ambiente de 40 °C (en el inversor, modo de energía almacenada)	10 min 102-110% de carga 60 s 111-125% de carga 300 ms > 126% de carga
Capacidad de sobrecarga a temperatura ambiente de 40 °C (en bypass)	Continuo < 125% de carga 10 ms 1000 % de carga Nota: Los fusibles de bypass pueden limitar la capacidad de sobrecarga.
Corriente de salida	Consulte la <i>Tabla 3-7: Corriente nominal y máxima para potencia y tensión nominales</i> en la página 32.
Factor de potencia de carga, (nominal)	1,0
Factor de potencia de carga, (rango permitido)	De 0,8 de retardo a 0,8 de adelanto

*Figura 5.8. Característiques tècniques a la sortida del SAI.*¹³

¹³ Font: Catàleg del fabricant del SAI de Eaton 93PM.

5.2. Disseny del sistema de refrigeració

Com s'ha comentat amb anterioritat, existeixen actualment al mercat diverses alternatives per tal de refrigerar els centres de dades. En el cas específic del Mare Nostrum, la refrigeració es fa per aire i aigua sent aquest un dels sistemes més eficients que existeixen en l'actualitat. Aquest sistema de refrigeració millora l'eficiència del sistema de refrigeració per únicament aire i presenta l'avantatge d'estar molt més introduït al mercat enfront al sistema de refrigeració per bany d'oli, que està en vies de desenvolupament.

A la Figura 5.9. on es mostra la planta del supercomputador, es poden observar els diferents racks (caixes color vermell, verd, blau i taronja) ubicats estratègicament en els diferents passadissos freds i calents indicats, per tal que la temperatura dels components sempre estigui en el rang de funcionament normal. A més, es poden observar les perforacions realitzades al terra flotant per on surten les corrents d'aire fred que prèviament s'ha refredat a les torres de refrigeració ubicades als extrems de la sala (superior i inferior).

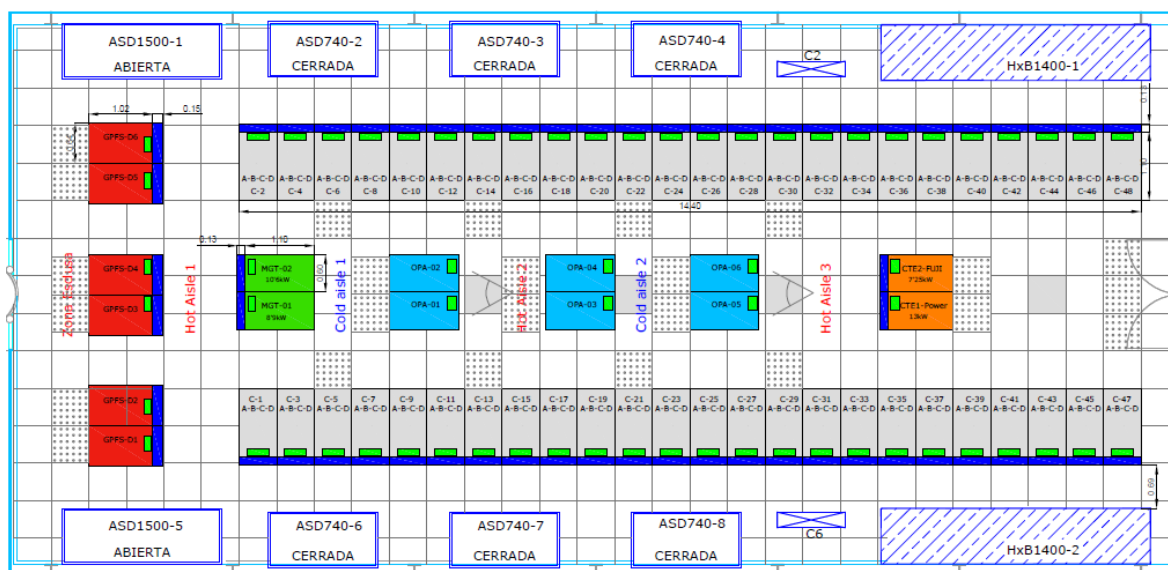


Figura 5.9. Esquema de la planta Mare Nostrum.¹⁴

El Mare Nostrum conté en total 7 *chillers*, les màquines que s'encarreguen de refredar l'aigua, 2 CLIMAVENETA i 5 STULZ, ubicats en una sala diferent a la sala tècnica mostrada a la Figura 5.9. Les dues primeres estan sempre en funcionament autoprogamant-se els circuits i compressors en funció de la consigna de temperatura sol·licitada i es pararien en el cas hipotètic de que la temperatura de l'aigua d'entrada arribés per sota dels 6°C, cosa que

¹⁴ Font: Imatge cortesia de l'equip tècnic de manteniment del *Barcelona Supercomputing Center*.

no és gens habitual. Per altra banda, disposen de 5 *chillers* STULZ que tenen programats amb un desllastament de temperatura, és a dir, que si la temperatura arriba a 7,1°C es posa en marxa una de les màquines, si arriba a 7,3°C es posa en marxa una altra en paral·lel, i així consecutivament.

A més, com a sistema de gestió, les màquines estan programades per tal que un cop enceses, romanguin en marxa durant 30 minuts tot i que la consigna de temperatura d'entrada ja estigui per sota de la desitjada, ja que pel funcionament dels compressors no interessa que aquests arranquin més d'un cop per hora, això podria repercutir negativament en la vida útil d'aquests.

5.3. Potència contractada / consum energètic

En referència a la quantitat de potència contractada pel centre de dades, aquesta és de 2,1 MW durant les 24 hores del dia i els 365 dies de l'any. Fa uns anys aquesta potència era de 1,9 MW però degut al creixement de necessitats del centre aquesta s'ha hagut d'augmentar a 2,1 MW. Aquesta és una potència que assegura el subministrament segur per a tota la càrrega que té connectada ja que està pensada per no ser íntegrament consumida.

5.4. Eficiència

En termes d'eficiència, el centre de dades Mare Nostrum té un PUE que oscil·la al voltant d'un valor de 1,5. En referència a estudis realitzats a altres centres de dades, cal dir que és una eficiència que està realment ajustada i per sota del valor mitjà d'aquest indicador que segons el departament d'energia dels Estats Units (DOE) el PUE mitjà per centres de dades és de 1.75 [13].

5.5. Perfils horaris de consum

A continuació, i gràcies a les dades facilitades pels tècnics del *Barcelona Supercomputing Center*, s'observa la tendència del consum total en un dia representatiu del centre de dades que inclou el consum del Mare Nostrum, les sales tècniques, les oficines i la infraestructura. A més, es coneix que el consum total mitjà diari és d'entre 36000 kWh i 38000 kWh i el consum específic diari del Mare Nostrum estaria sobre els 27000 kWh i 30000 kWh aproximadament.

A la Figura 5.10. es pot observar com el consum horari segueix un patró lineal al llarg del dia ja que, per temes d'eficiència del sistema de refrigeració i pel propi funcionament dels processadors, no interessa que hi hagi diferències horàries de consum fent que tot estigui

funcionant constantment al llarg del dia. D'aquesta manera, el sistema de refrigeració no pateix canvis sobtats de temperatura de l'aigua que arriba a l'entrada dels *chillers* més que aquells provocats per les condicions mediambientals canviant al llarg del dia.

Així, es pot observar com els servidors estan en funcionament amb un estat de càrrega constant als processadors i es poden deduir les variacions de consum als sistemes de refrigeració, a les sales tècniques, a les oficines i a la infraestructura.

En quant a la discontinuïtat que es dona entre les 2:00h i les 4:00h, és deguda al temps en que no s'ha carregat un processador entre un projecte i un altre, és habitual que trigui alguna hora fins que es torna a carregar.

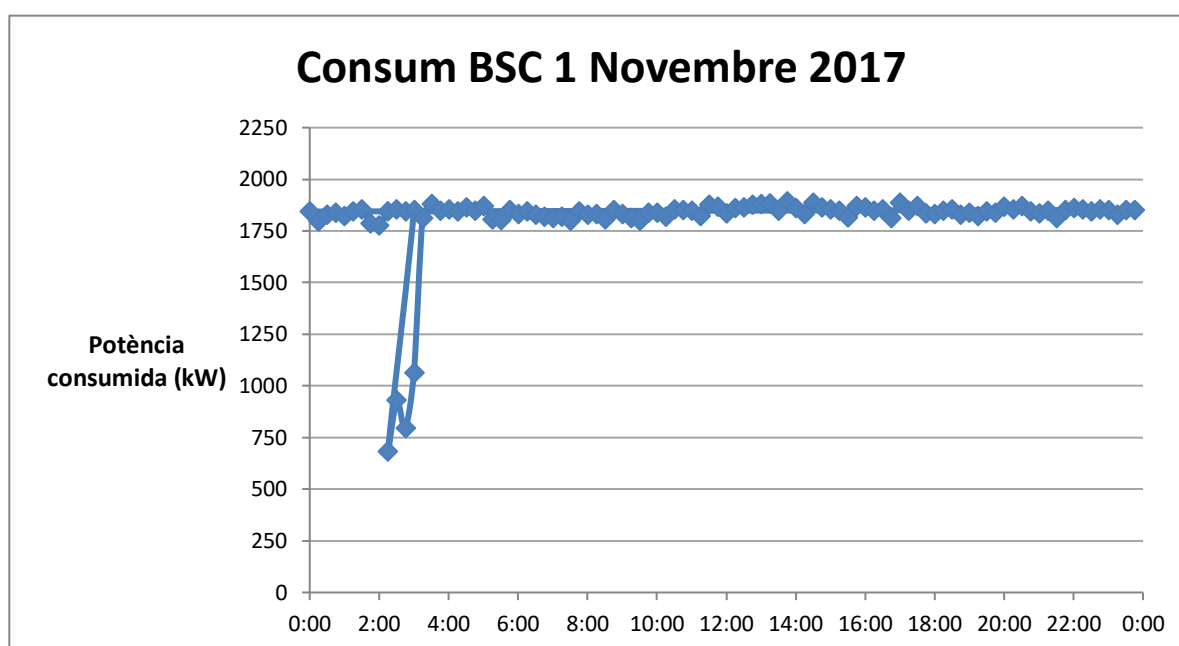


Figura 5.10. Exemple de consum del Barcelona Supercomputing Center (1 Nov, 2017).¹⁵

5.6. Utilització del sistema dièsel

En quant a la utilització del sistema dièsel, aquest sistema que és capaç de donar energia a la càrrega en una averia del sistema d'alimentació principal de la xarxa i quan els UPS ja s'han descarregat completament, cal dir que és un sistema que no es fa servir molt sovint. S'utilitza 1 o 2 vegades l'any durant 8 hores per tal de realitzar diverses tasques de manteniment. La probabilitat de que aquest sistema es posi en funcionament a causa de problemes amb l'alimentació provinent de la xarxa és molt baixa a que la xarxa és molt fiable a Barcelona, segons han comentat els tècnics del *Barcelona Supercomputing Center*.

¹⁵ Font: Imatge cortesia de l'equip tècnic de manteniment del *Barcelona Supercomputing Center*.

6. Propostes de millora al centre de dades Mare Nostrum

A continuació es presenten tres de les alternatives pensades per ser aplicables al centre de dades Mare Nostrum per a la seva optimització. Cal comentar que s'han arribat a plantejar aquestes millores partint d'una idea inicial de substituir el grup electrogen per un banc de bateries que fos capaç de reaccionar molt més ràpidament enfront a un possible tall de subministrament, solucionant el temps de resposta i millorant la seguretat d'aquesta instal·lació.

Aquesta idea inicial, va ser descartada després de la realització d'una visita al centre on es va conèixer que el generador rarament es posava en funcionament per averies a l'alimentació de la xarxa, sinó que ho feia per realitzar tasques de manteniment.

Un cop descartada la idea inicial proposada, es va realitzar una recerca més profunda de les principals àrees d'ineficiència dels centres de dades de tot el món per tal de trobar idees que es poguessin implantar al centre de dades Mare Nostrum. En primer lloc, es presenta una alternativa proposada per Microsoft que s'hauria d'adaptar al centre de dades concret objecte d'estudi. En segon lloc, s'estudia l'opció de dimensionar un banc de bateries que substituïxi a l'actual grup electrogen present al centre de dades amb determinades funcions addicionals, no únicament per treballar quan es donin averies o per realitzar tasques de manteniment. Finalment, es planteja estudiar una alternativa que millori l'eficiència del sistema de refrigeració, sent aquesta àrea una de les que més consumeixen.

6.1. Unitat d'emmagatzematge local de energia (LES)

Com s'ha comentat amb anterioritat, en el disseny elèctric típic d'un centre de dades, existeixen sistemes de subministrament d'energia ininterrompuda (SAI) que consten de grans bancs de bateries de plom àcid que ocupen sales de grans dimensions. Aquests, que s'encarreguen de subministrar energia als servidors en un possible tall del subministrament elèctric, s'ubiquen entre el subministrament d'alta tensió que arriba al CPD procedent de les subestacions de la xarxa elèctrica i el servidor i la maquinaria d'emmagatzematge (Figura 6.1.), que funcionen a un voltatge molt més baix dintre del centre de dades.

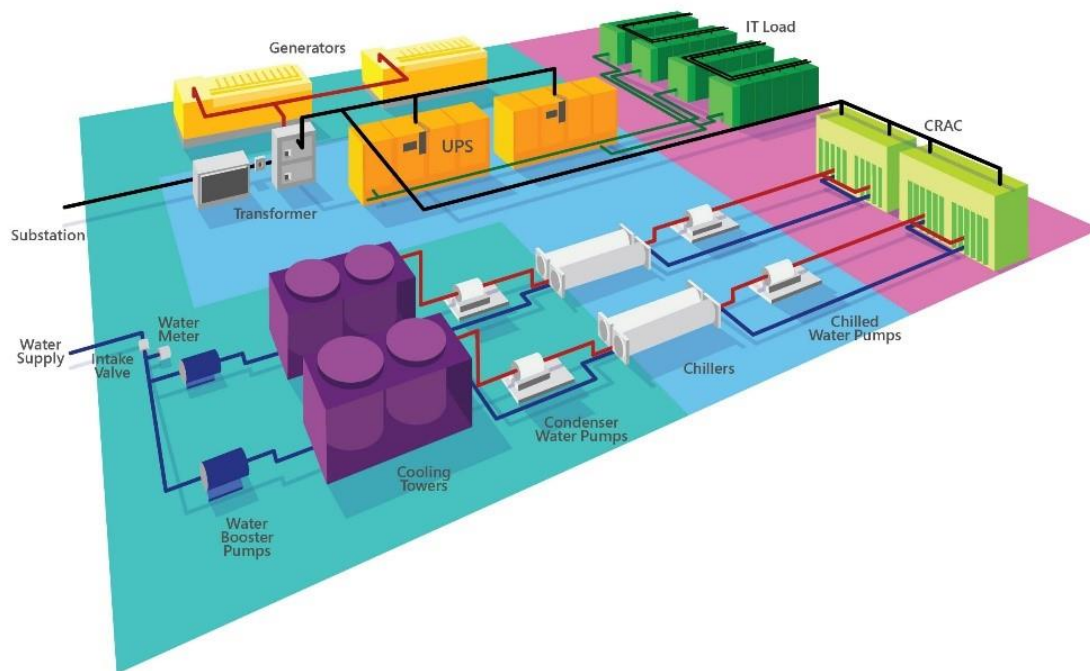


Figura 6.1. Disseny del sistema d'alimentació d'un centre de dades convencional.¹⁶

Els sistemes tradicionalment utilitzats però, generen diverses ineficiències per a la implementació del centre de dades [9]:

- L'espai que ocupa la sala on estan ubicats els SAI's pot representar aproximadament un quart de la superfície total útil dels centres de dades (en un centre de dades de 25MW típic) amb les conseqüents despeses econòmiques derivades de la construcció d'aquestes sales separades, amb parets gruixudes i ventilació especial per a gas d'hidrogen, que equivalen a 31 milions de dòlars que es podrien estalviar (en referència a la instal·lació de 25MW).
- En un centre de dades, en general, abans de subministrar el voltatge pertinent als servidors és necessària una conversió AC/DC. A més, per als sistemes d'alimentació ininterrompuda presents als centres de dades, es presenten dues conversions més AC/DC i DC/AC abans de l'esmentada anteriorment necessàries per a la càrrega de la bateria. Aquestes transformacions, suposen una ineficiència del sistema de SAI que afecta negativament al PUE del centre de dades fins en un 17%.

La unitat d'emmagatzematge local d'energia o *Local Energy Storage* (LES) dissenyada per Microsoft és un exemple de sistema distribuït alternatiu a la centralització de bancs de

¹⁶ Font: <https://cloudblogs.microsoft.com/hybridcloud/2015/03/10/microsoft-reinvents-datacenter-power-backup-with-new-open-compute-project-specification/>

bateries de suport (SAI) tradicional dels centres de dades. La innovació està en el canvi subtil de bateries centrals massives a petites distribuïdes en els servidors existents que puguin suportar les breus interrupcions elèctriques (Figura 6.2.).

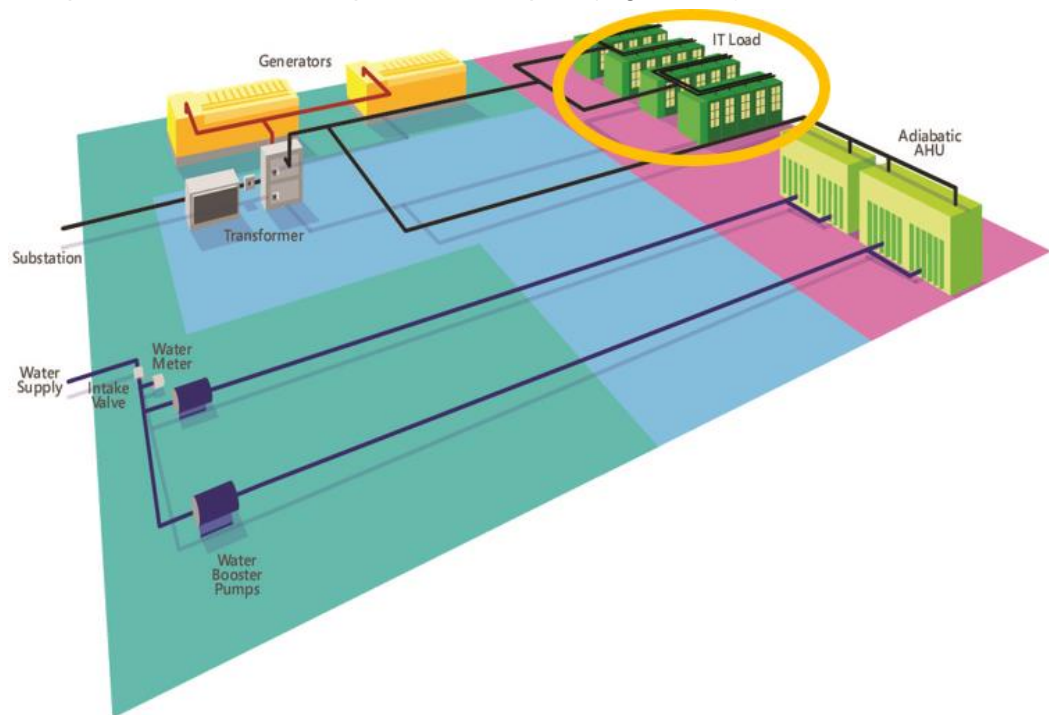


Figura 6.2. Disseny del sistema d'alimentació del centre de dades proposat per Microsoft.¹⁷

Tots els servidors que utilitzen una font d'alimentació commutada o *Power Supply Unit* (PSU) moderna tenen inclosa una correcció del factor de potència activa, un emmagatzematge capacitiu i una etapa de sortida DC/DC aïllada com es mostra a la Figura 6.3. La topologia LES reutilitza aquests circuits existents i afegeix una bateria, un sistema controlador del subministrament elèctric de la bateria, un carregador aïllat de baixa corrent i una sortida aïllada de baixa corrent com es mostra a la Figura 6.3. D'aquesta manera, es poden eliminar els SAI's o UPS i així corregir les esmentades ineficiències que afecten significativament en el consum global del centre de dades sense deixar desprotegida la càrrega en un possible tall del subministrament elèctric.

¹⁷ Font: <https://cloudblogs.microsoft.com/hybridcloud/2015/03/10/microsoft-reinvents-datacenter-power-backup-with-new-open-compute-project-specification/>

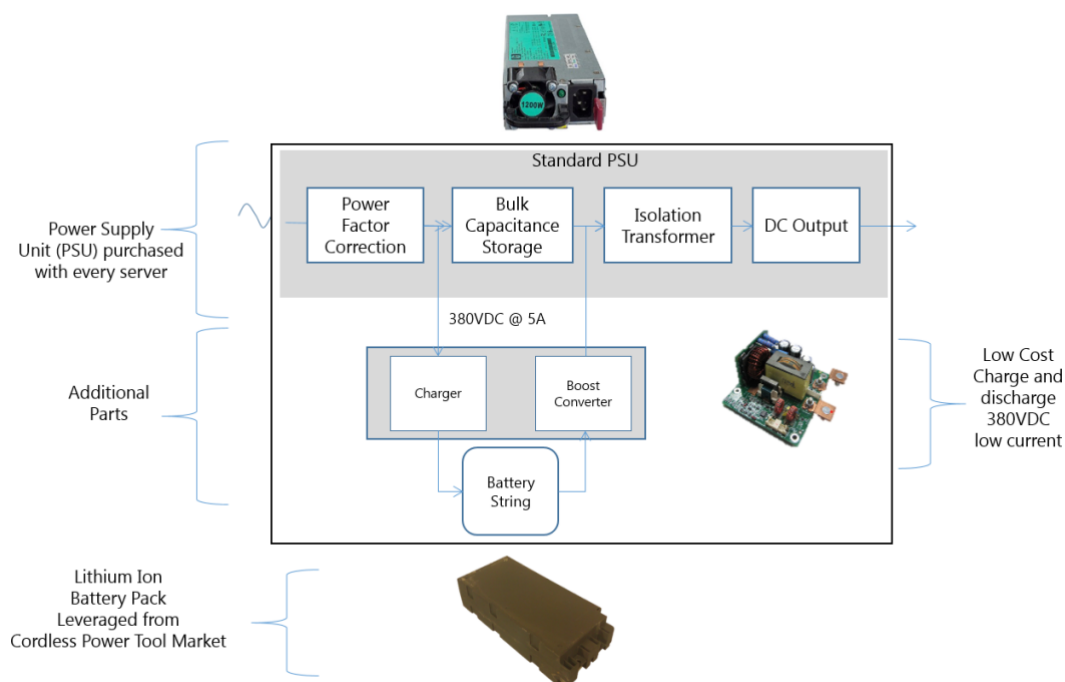


Figura 6.3. Disseny del sistema d'alimentació típic o Power Supply Unit (PSU).¹⁸

Aquest innovador sistema LES requereix de la utilització de sistemes d'emmagatzematge d'energia (bateries) i, dintre de les possibilitats existents al mercat, n'utilitzen bateries de liti al ser aquestes de baix cost, alt rendiment i alta qualitat a més de la seva elevada densitat d'energia, és a dir, que acumulen molta més càrrega per unitat de pes i volum.

Amb la innovadora idea que proposa Microsoft per al seu centre de dades, es planteja realitzar un disseny de distribució local d'energia per al centre de dades objecte d'estudi que solucioni els problemes d'ineficiència energètica i despeses econòmiques derivades de la construcció i manteniment de les sales que contenen els sistemes d'alimentació ininterrompuda.

6.1.1. Patents

Per tal de conèixer altres alternatives a la que proposa Microsoft de sistemes d'emmagatzematge local d'energia, s'ha fet una recerca de patents relacionades amb el tema, la majoria obtenint mateixos resultats. A continuació, es mostren les més interessants, de les que es pot extreure informació per tal de fer el disseny específic per al centre de dades Mare Nostrum.

¹⁸ Font: <https://cloudblogs.microsoft.com/hybridcloud/2015/03/10/microsoft-reinvents-datacenter-power-backup-with-new-open-compute-project-specification/>

1. Rack basat en una font d'alimentació ininterrompuda. Microsoft Corporation [7]:

Es planteja una unitat de potència que està configurada per ser inserida en un *rack* d'un centre de dades. La unitat de potència del *rack* inclou una o més fonts d'alimentació (PSU) i una o més bateries. La o les fonts d'alimentació que es troben al *rack* estan configurades per rebre energia (amb corrent alterna) i convertir-la a una alimentació de corrent continu (convertidor). A més, la o les fonts d'alimentació estan configurades per emetre la potència de CC (corrent continu) a un bus elèctric de CC del dispositiu *rack*. La bateria o bateries es configuren per proporcionar, com a resposta a una interrupció de la potència rebuda per la xarxa, la potència de corrent continu al bus elèctric de CC del bastidor del dispositiu. D'aquesta manera els servidors seguirien funcionant fins que la o les bateries es descarreguessin completament.

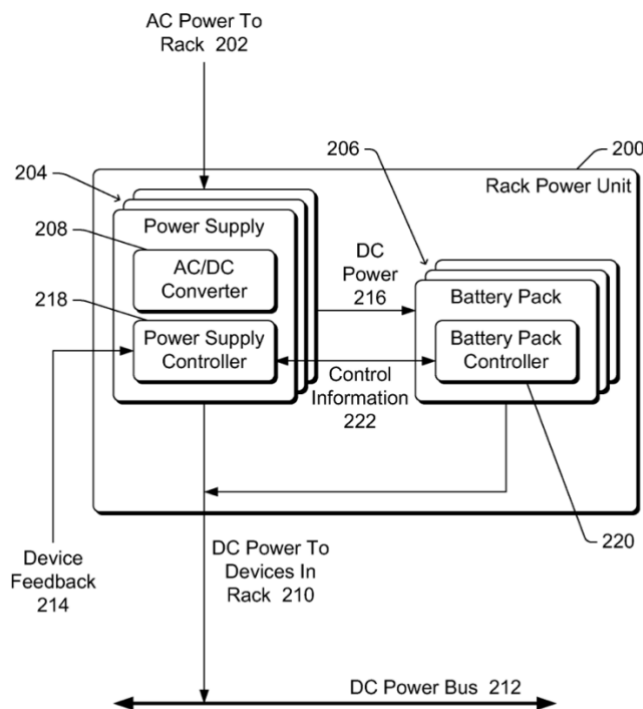


Figura 6.4. Unitat de potència d'un rack.¹⁹

2. Arquitectura de distribució d'energia ininterrompuda d'un centre de dades. Exaflop Llc [8]:

¹⁹ Font:

https://www.google.es/patents/US7560831?dq=microsoft+data+center+batteries&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwi-sL_13ZrXAhWIMSYKHZeAPwQ6AEIJzAA

Els aparells i els mètodes associats i els productes dels programes informàtics impliquen una arquitectura d'interrupció d'energia d'alta eficiència per suportar unitats de processament modulars. La unitat de processament modular que es proposa inclou un sistema d'energia ininterrompuda en el qual només es produeix una rectificació d'AC a DC entre la xarxa d'alimentació AC i el circuit de processament (servidors). Es planteja una arquitectura de distribució de potència que inclou una matriu modular d'unitats de processament muntables al *rack*, cadascuna de les quals disposa de circuits de processament per gestionar tasques de processament relacionades amb la xarxa. Associada a cada unitat de processament modular hi ha una font d'alimentació ininterrompuda (UPS) que inclou un circuit de bateries configurat per connectar operativament una bateria a través d'un bus de CC durant una possible fallada en que el senyal de voltatge d'entrada CA està fora del rang de funcionament normal, una etapa de rectificació CA/CC en què es converteix el senyal d'entrada CA a un sol senyal de sortida CC a través d'un bus de CC quan el senyal d'entrada està dins del rang de funcionament i un controlador per activar selectivament el circuit de conversió CA/CC per reprendre el subministrament d'energia quan la senyal d'entrada CA torna al rang de funcionament normal.

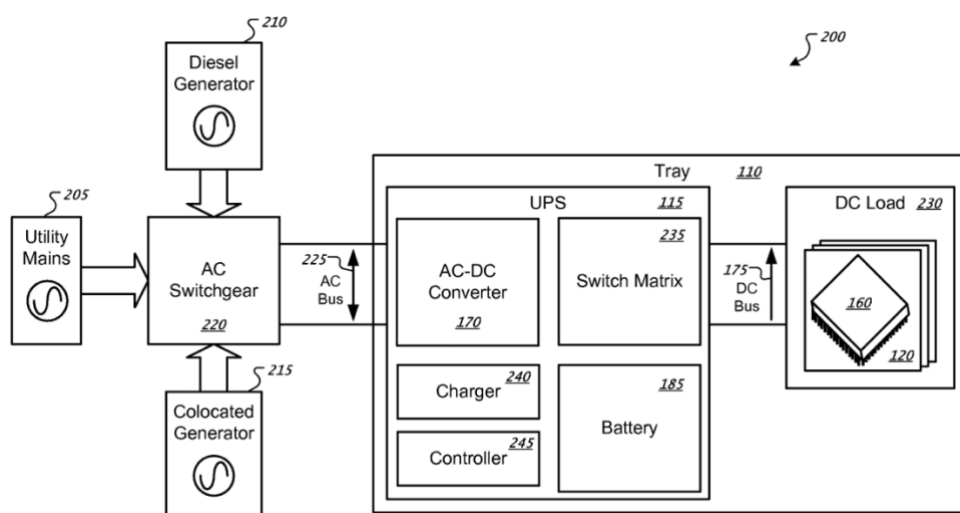


Figura 6.5. Arquitectura del sistema elèctric plantejat.²⁰

3. Càrrega de TI d'acoblament directe. Exaflop Llc[9]:

Els aparells i els mètodes associats i els productes del programa informàtic impliquen una arquitectura d'interrupció d'energia d'alta eficiència per suportar unitats de

²⁰ Font:

https://www.google.es/patents/US7560831?dq=microsoft+data+center+batteries&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwi-sL_13ZrXAhWIMSYKHaZeAPwQ6AEIJzAA

processament modulars. Per això, es planteja una unitat de processament modular que inclou un sistema d'alimentació ininterrompuda integrada en què es produeix una conversió AC/DC amb una correcció del factor de potència PFC (Power Factor Correction) entre la xarxa d'alimentació en corrent altern AC i el circuit de processament (servidors). En aquesta instal·lació del centre de dades que es planteja, s'inclou una matriu modular d'unitats de processament muntables al *rack*, cadascuna de les quals disposa de circuits de processament per gestionar tasques relacionades amb la xarxa. A cada unitat de processament modular hi ha una font d'alimentació ininterrompuda (UPS) integrada que inclou una bateria connectada de manera selectiva a través d'un bus de CC i un rectificador CA/CC que converteix una tensió d'entrada de CA a una única tensió de sortida en el bus CC. La tensió d'autobús CC regulada pot estar a prop de la tensió totalment carregada de la bateria.

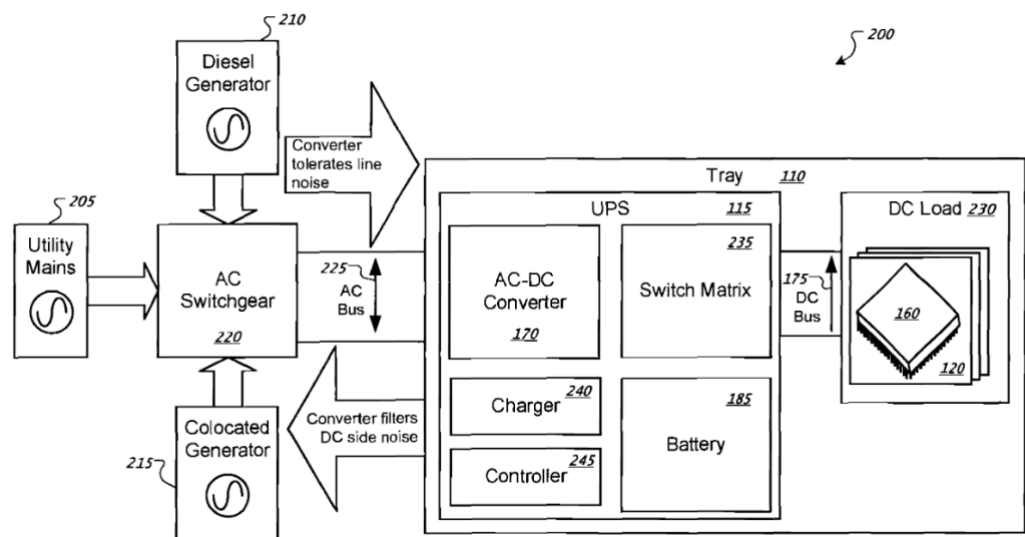


Figura 6.6. Arquitectura del sistema elèctric plantejat.²¹

Un cop mostrades les patents trobades que tracten de millorar l'arquitectura del sistema elèctric dels centres de dades, es pot observar que totes plantegen la reducció de les etapes de transformació que provoquen ineficiències i que són innecessàries. Amb aquest objectiu, es pot plantejar un sistema elèctric específic per al centre de dades Mare Nostrum en que s'eliminin etapes de transformació sense eliminar la funció que realitzen els sistemes d'alimentació ininterrompuda d'alimentar la càrrega donat un problema amb l'alimentació de xarxa.

²¹ Font:

<https://www.google.es/patents/US8080900?dq=microsoft+data+center+batteries&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwi7zITd35rXAhXLWRQKHeUwCTc4FBD0AQhKMAQ>

6.2. Substitució del grup electrogen per un banc de bateries

Considerant que el grup electrogen del que disposa el Mare Nostrum és un sistema de generació d'energia elèctrica que no és respectuós amb el medi ambient amb el que respecta a la utilització de combustibles fòssils, és planteja com a solució alternativa a l'ús d'aquest sistema la substitució completa d'aquest per un banc de bateries dimensionat per cobrir una determinada autonomia.

Tot i pensar que aquestes bateries tampoc ajudarien a reduir l'impacte ambiental, aquestes podrien reduir elevats costos al centre de dades ja que es podrien carregar durant la nit, on el preu del kWh és molt més baix, i descarregar-se durant el dia, amb la consegüent reducció de l'ús d'energia elèctrica a les hores on més cara és. Això, comportaria elevats beneficis econòmics per al centre de dades, tot i que, inicialment, s'estaria utilitzant també una energia elèctrica que, normalment no prové de fonts renovables.

A la Figura 5.10. es mostra el consum del *Barcelona Supercomputing Center* d'un dia qualsevol, on clarament s'observa una tendència de consum al llarg del dia lineal. Amb això es vol conscienciar de la idea de que, tenint una potència contractada que supera la potència que es consumeix, es tenen contractats 2.1 MW de potència i s'observa que la potència consumida màxima del dia és de 1892 kW, es pot reaprofitar aquesta potència sobrant durant la nit per tal de carregar el banc de bateries que es proposa a un preu kWh molt més baix i reaprofitar aquesta energia durant el dia, en que el preu del kWh puja.

Amb la finalitat de reduir, a més de les despeses econòmiques derivades del gran consum d'energia, l'impacte mediambiental que suposa el funcionament del centre de dades, es podria plantejar algun sistema de generació d'energia sostenible que fos respectuós amb el medi ambient i que es pogués incorporar a les instal·lacions del centre de dades Mare Nostrum.

6.3. Millora de l'eficiència del sistema de refrigeració

Com s'ha explicat amb anterioritat, el sistema actual de refrigeració del centre de dades funciona per refrigeració d'aire i aigua, sent l'element a refredar l'aigua ja que aquesta és la que després refreda l'aire. L'aigua es refrigera a unes màquines anomenades *chillers* que absorbeixen la calor del aigua mentre aquesta passa per uns intercanviadors de calor, passant d'uns aproximadament 10°C a 6°C amb un cabal de 255m³/h.

Per tal de proporcionar a la sortida de les màquines refredadores sempre la temperatura desitjada de l'aigua, s'han de considerar les variacions mediambientals de l'entorn del centre de dades i altres paràmetres que poden afectar a la necessitat de refrigeració de l'aigua. Per aquesta raó, el sistema de control del centre acciona els *chillers* de suport de menor

potencia al arribar a uns determinats valors de temperatura de sortida de l'aigua que no son els desitjats, sent aquest control esglaonat.

Coneixent el gran consum energètic del centre de dades degut al sistema de refrigeració, es planteja estudiar alguna mesura d'eficiència energètica dels *chillers*, on hi ha més marge de guany que amb la millora del sistema dièsel, que pràcticament s'utilitza un cop a l'any i no suposaria grans millores globals.

Els *chillers*, les màquines on es refrigera l'aigua, son màquines que funcionen a velocitat constant a les quals no es pot regular el punt de funcionament pel disseny del seu sistema de control. Per aquesta raó, es planteja estudiar si aquestes màquines admetrien una freqüència elèctrica variable per tal d'introduir variadors de freqüència que gestionin la velocitat dels *chillers* i, per tant, el seu punt de funcionament.

D'aquesta manera, la temperatura de sortida de l'aigua seria pràcticament constant, no com actualment en que existeixen pics deguts a l'ús de més d'un *chillers* de reserva quan es supera el valor òptim de sortida de la temperatura de l'aigua.

7. Desenvolupament de l'alternativa escollida

7.1. Elecció de l'alternativa

Analitzades les alternatives, es compararan aquestes segons uns criteris de valoració que definiran si l'alternativa compleix o no amb els requeriments que permeten que aquesta resolgui amb èxit el problema d'ineficiència energètica plantejat. Finalment, s'escollirà aquella alternativa que millor compleixi amb aquests criteris i més s'adapti als objectius plantejats al començar amb el projecte. L'objectiu d'aquest estudi és escollir aquella alternativa és la que millor s'adapta al problema plantejat en el cas particular del centre de dades Mare Nostrum considerant que a les menys favorables per aquest poden ser les més favorables en un estudi similar d'un altre centre de dades.

Com a motivació principal del projecte, es buscava una alternativa al sistema actual que ajudés a fer del centre un lloc més respectuós amb el medi ambient. Sent aquest el criteri de valoració de més pes entre els existents, és el que ajudarà a descartar l'alternativa més desfavorable. Amb aquest objectiu i, valorant les alternatives presentades, l'alternativa de substituir el grup electrogen per un banc de bateries carregades per la nit i descarregades durant el dia és la solució que menys redueix l'aspecte d'impacte mediambiental. Per una banda, si les bateries fossin carregades amb energia elèctrica de la xarxa, aquesta vindria molt possiblement de fonts no renovables, pel que també seria una tipologia d'energia poc respectuosa amb el medi. Per altra banda, l'opció de plantejar un sistema de generació d'energia renovable s'allunya dels objectius de millora de la instal·lació actual ja que implicaria la construcció d'un sistema nou, amb els consegüents problemes derivats de la construcció d'aquest nou sistema (econòmics, dimensionals, etc.).

El segon criteri que es planteja per valorar la millor alternativa a estudiar és la reducció econòmica que suposaria la implantació del sistema seleccionat. Tot i ser l'opció de la substitució del grup electrogen per bancs de bateries la que aparentment compleix més aquest criteri, és descartada per no complir amb la motivació del projecte (millora de la gestió energètica). Aleshores, entre les dues alternatives restants, seria necessari realitzar prèviament un estudi econòmic per a poder valorar la més adequada.

En aquesta fase del projecte, es decideix optar per l'alternativa de la distribució local d'energia per ser l'alternativa que més motiva i donat que es planteja un estudi molt interessant a realitzar. No es considera que l'alternativa de dissenyar un variador de freqüència per al sistema de control dels *chillers* sigui una opció que no físicament realitzable, també es considera una millora que pot donar resultats molt interessants però, donat que s'ha de focalitzar l'estudi en un àrea en concret, s'estudiarà el disseny del sistema

elèctric que optimitzi el sistema actual amb l'adaptació de l'idea plantejada per Microsoft.

7.2. Descripció de l'alternativa seleccionada

Després d'estudiar detingudament les idees que plantegen les patents relacionades amb el tema de l'optimització de l'arquitectura del sistema elèctric i de modelitzar el sistema elèctric actual del centre de dades Mare Nostrum, com es mostra a la Figura 7.1, es proposa que la millora d'aquest sistema elèctric sigui la mostrada a la Figura 7.3 .

La Figura 7.1, mostra el disseny elèctric actual d'una línia en que un cop entra el corrent provinent de la xarxa i passa pel transformador, aquest passa per l'UPS, on es realitza una doble conversió d'energia: primerament es dona una primera transformació de corrent altern CA a corrent continu DC per tal de carregar un banc de bateries i posteriorment es torna a transformar a corrent alterna AC per traslladar-la fins la font d'alimentació PSU. Al PSU, que es detalla a la Figura 7.2., arriba corrent en altern i es transforma a corrent continu primerament. A continuació, es pot observar que hi ha un condensador amb la finalitat de mantenir constant el voltatge. Seguidament, es troba una transformació DC/DC amb aïllament galvànic que consta de tres etapes (DC/AC, transformador i AC/DC) en que es proporciona al sistema seguretat entre la part d'alta tensió i de baixa tensió evitant el dany a altres parts del circuit. Finalment, la sortida del corrent continu de baixa tensió (12 V) arriba a la càrrega on estan alimentats els servidors a una certa potència.

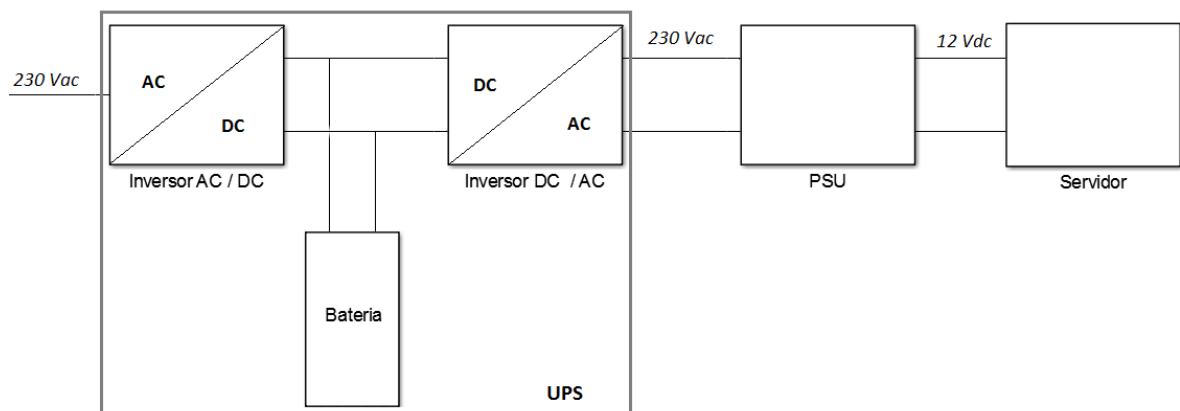


Figura 7.1. Disseny del sistema elèctric actual d'una línia (després del transformador).

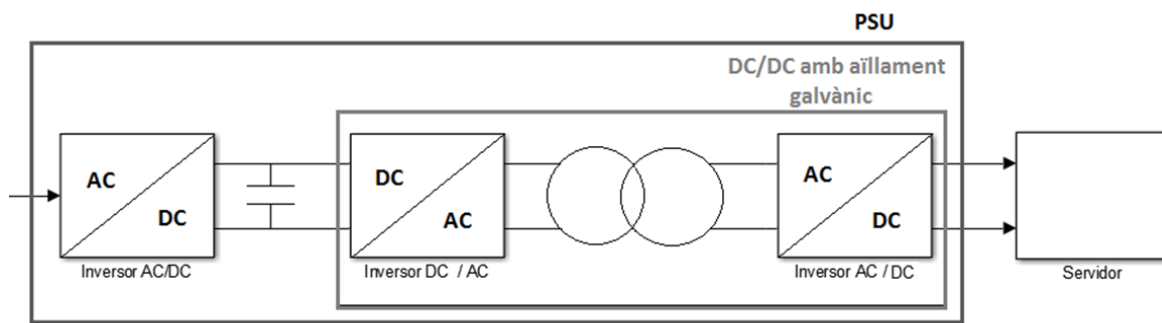


Figura 7.2. Detall del PSU.

En quant al sistema de millora de la instal·lació que es proposa, aquest millora notablement les etapes de transformació ja que només en té dues entre el corrent provinent del transformador i la càrrega (servidors), com es mostra a la Figura 7.3. A diferència del disseny actual, en aquest s'ha eliminat el UPS on es donaven dues conversions, i s'ha mantingut el PSU on es realitzen dues també. Al arribar el corrent altern de la xarxa elèctrica convencional i un cop passa pel transformador, aquest és transformat en un inversor de corrent altern CA a corrent continu DC i posteriorment és transformat de corrent continu a corrent continu DC/DC mitjançant un convertidor que en redueix la tensió del corrent per tal d'alimentar la càrrega (servidors) que treballa a voltatges molt baixos (12 V). A més, aquesta sortida de corrent continu a baix voltatge és la que també alimenta les bateries distribuïdes als servidors que seran operatives quan existeixin incidències de la xarxa elèctrica. El canvi ha provocat que les bateries s'haguessin de traslladar a la sortida del PSU on ja estan alimentades a baixa tensió. En aquesta figura, per tant, es pot observar la diferència entre el disseny actual (mostrat a la Figura 7.1) i la proposta de millora (mostrada a la Figura 7.3) que en simplifica bastant les fases de transformació en què existeixen pèrdues innecessàries degudes a les ineficiències dels components.

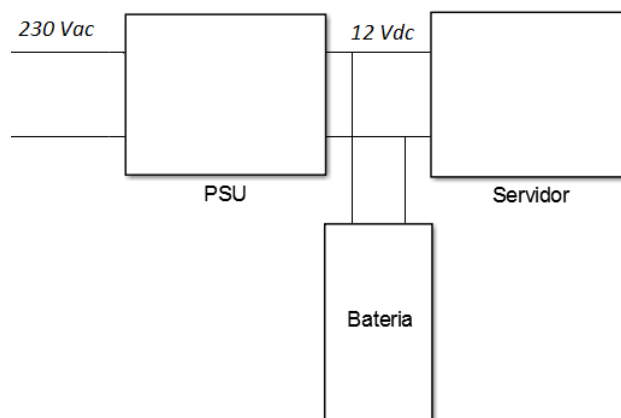


Figura 7.3. Disseny de l'esquema elèctric de la proposta de millora d'una línia (després del transformador).

7.3. Plantejament de l'estudi

Escollida la millor alternativa per aplicar al centre de dades, a continuació es plantegen les fases de l'estudi per aconseguir adaptar la idea que proposa Microsoft al Mare Nostrum.

- Disseny amb eines de simulació de Matlab/Simulink de l'arquitectura del sistema elèctric actual del centre (inclou la modelització de cada element que conforma aquest sistema).
- Anàlisi d'eficiència de cadascun d'aquests components i de l'eficiència global de les línies que s'estan estudiant.
- Disseny amb eines de simulació de Matlab/Simulink de l'arquitectura del nou sistema elèctric del centre (eliminació dels SAI's i incorporació d'algun nou component si és necessari).
- Anàlisi d'eficiència d'aquest nou model de sistema elèctric.
- Estudi comparatiu en termes energètics dels dos models de sistema elèctric per al centre de dades Mare Nostrum. Es compararà l'eficiència global dels dos sistemes per tal de poder assegurar si la millora ha optimitzat el sistema existent actualment.

8. Anàlisi tècnic

L'anàlisi tècnic de la solució proposada, com s'ha comentat, consisteix en estudiar l'eficiència que suposa la millora incorporada amb respecte a l'eficiència que ja tenia el sistema existent al centre de dades actualment.

Per tal de poder avaluar la millora d'eficiència que suposa l'emmagatzematge local d'energia als servidors, es planteja estudiar el sistema elèctric del centre de dades mitjançant diagrames de blocs en què, a partir de les potències en cada tram de d'instal·lació i de les pèrdues que suposa cada element d'aquesta, es podrà fer un estudi comparatiu del disseny elèctric actual del centre de dades amb la proposta de millora. Per tal de poder comparar els dos dissenys elèctrics, s'estudiarà la eficiència de les dues arquitectures coneguda com:

$$\eta = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{consumida}}} \quad \text{(Eq. 8.1.)}$$

On:

- $P_{\text{útil}}$ és la potència que arriba a la càrrega.
- $P_{\text{consumida}}$ és la potència que subministra la xarxa.

Per això, donat que el sistema elèctric del centre de dades és complex, i partint dels esquemes elèctrics facilitats pel director del BSC (*Barcelona Supercomputing Center*) que es poden simplificar en l'esquema elèctric mostrat a la Figura 5.2., s'ha dissenyat un sistema de blocs que representa cadascuna de les línies de l'arquitectura del sistema elèctric (Figura 8.1) en què el disseny del diagrama de blocs s'ha realitzat a contra flux, és a dir, al contrari del flux d'energia que arriba de la xarxa i finalitza a la càrrega.

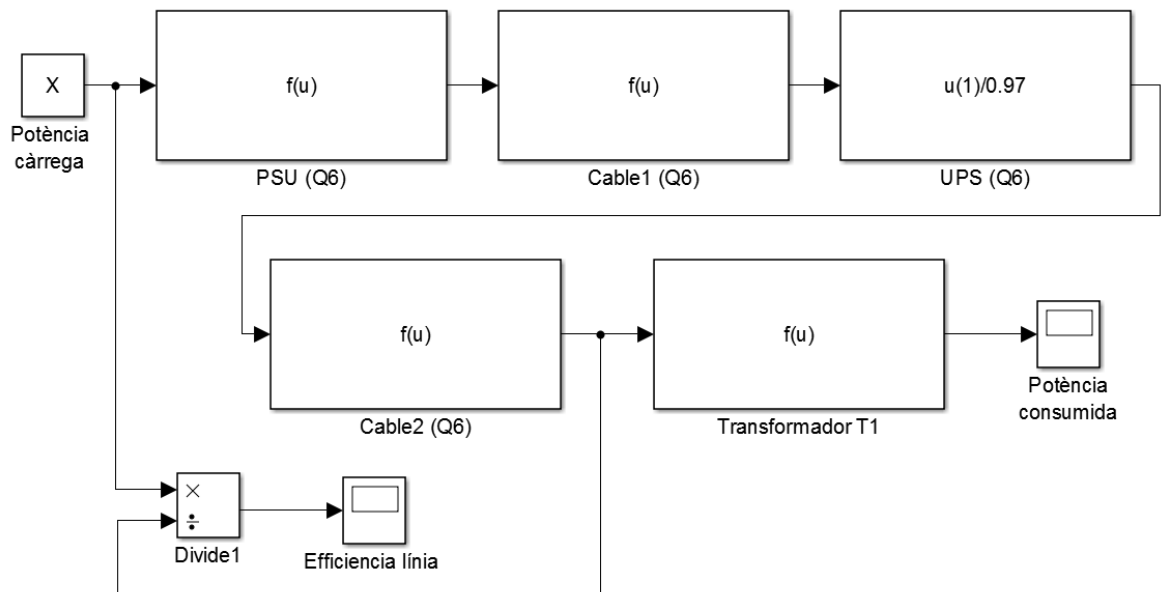


Figura 8.1. Esquema Matlab/Simulink d'una línia del sistema elèctric.

Coneixent les potències que arriben a cada quadre elèctric o càrrega, es realitzarà cadascuna de les línies seguint el model representat anteriorment en què cada bloc representa la funció d'eficiència o ineficiència d'un determinat component que es troba al llarg de la línia de distribució de l'energia elèctrica, des de la xarxa fins a la càrrega.

Per tal de dur a terme aquest estudi, és necessari realitzar prèviament una modelització dels elements que conformen el sistema i que seran part de la simulació que és realitzarà.

8.1. Modelització dels elements del sistema

Com es mostra a la Figura 8.1, que si es vol entendre seguint el flux normal de corrent s'ha de llegir al revés de les fletxes, cada línia contindria un bloc PSU en que es realitza la conversió de corrent altern a continu CA/DC, un bloc que representaria el cable que connecta el bloc PSU amb la UPS, el bloc UPS en que es dona una doble conversió DC/DC i AC/DC, un altre cable que connecta el bloc UPS amb el transformador i, finalment, el bloc transformador. Aquest seria un exemple d'una línia de les que existeixen actualment instal·lades al Mare Nostrum.

També, donat que només es realitzarà una optimització d'aquelles línies en que existeixen sistemes d'alimentació ininterrompuda SAI, només es treballarà l'optimització d'aquestes línies que són, en referència a la numeració de la Figura 5.2., les que alimenten els quadres 2 i 6.

8.1.1. Bloc Perfil de càrrega

El primer element del diagrama de blocs de cada línia és el bloc anomenat perfil de càrrega. Aquest representa les possibles càrregues de cada línia que poden seguir un perfil donat o poden ser un valor fixat. Serà un bloc idèntic per als dos sistemes elèctrics que s'estudiaran: el sistema elèctric actual i el millorat.

Coneixent els valors de potència nominal a cada càrrega, s'ha plantejat que el bloc segueixi un perfil en que s'escombrin les càrregues des d'un valor de potència que representi un percentatge molt baix amb respecte a la nominal, fins que arribi al 100% d'aquesta. Així, es podrà realitzar una simulació en que es podrà veure l'eficiència de la línia per a qualsevol càrrega en el component.

Tenint en compte que es realitzarà la simulació de 2 línies, les corresponents als quadres 2 i 6, a continuació es mostren les càrregues nominals de cadascun dels quadres recollides a la Taula 8.1. i obtingudes gràcies a la informació aportada pel personal del *Barcelona Supercomputing Center*.

Quadre	Càrrega nominal [kW]
2	83,103
6	96,603

Taula 8.1. Càrrega nominal de cada línia (2, 3 i 6).²²

Amb aquesta informació, finalment es decideix que el bloc càrrega que representi cada perfil sigui una funció lineal que va des de que la càrrega és nul·la, fins que pren el seu valor nominal (Taula 8.2).

Quadre	$f(u)$
2	$83,103 \cdot x$ on $x = [0,1]$
6	$96,603 \cdot x$ on $x = [0,1]$

Taula 8.2. Funcions del bloc perfil de càrrega per a les 2 línies.

8.1.2. Bloc PSU

A continuació del bloc anomenat perfil de càrrega es troba el bloc PSU (*Power Supply Unit*) quan s'estigui modelant el sistema elèctric actual del centre de dades Mare Nostrum i també quan s'estigui modelitzant el sistema elèctric a optimitzar ja que aquest inclou dues etapes de transformació idèntiques a les que es realitzen en el PSU convencional.

²² Font: Miguel Armenta, tècnic de manteniment del *Barcelona Supercomputing Center*.

Aquest és el que representa la font d'alimentació o de potència, un dispositiu que realitza la conversió de corrent alterna a corrent continua (AC/DC) per alimentar la càrrega que té connectada (els servidors o *racks*). Donat que els servidors s'alimenten a corrent continua, es planteja que el bloc PSU sigui una funció representativa de la corba d'ineficiència de l'inversor que realitza la conversió AC/DC. Així, l'entrada a aquest bloc serà la potència que rep la càrrega i la sortida serà la potència que ha hagut d'entrar a l'inversor considerant la ineficiència d'aquest component.

Donat que no es coneix el tipus d'inversor que contenen els *racks* del centre de dades objecte d'estudi, es planteja agafar un convertidor comercial que sigui representatiu per poder validar els càlculs teòrics comparatius que s'estan duent a terme. Es coneix que el tipus de racks del supercomputador son *Lenovo SD530* [13] i que per aquest component és necessari garantir un certificat 80 PLUS Platinum d'eficiència segons especifica la guia del producte [11]. Per aquesta raó, s'ha considerat una font d'alimentació certificada per aplicacions a centres de dades que, d'entre les 3 categories d'eficiència a escollir (bronze, plata, or), representa un nivell mitjà d'eficiència (plata) [12].

El convertidor AC/DC seleccionat per modelitzar el PSU ha sigut el *Lenovo FSG023* que garanteix aquest nivell d'eficiència requerit i, a més, treballa amb un voltatge d'entrada d'entre 200V i 240V com és el cas dels convertidors que estan al centre de dades. Donades les dades d'eficiència funció del factor de càrrega obtingudes de la fitxa tècnica, s'ha pogut calcular la corba d'eficiència del component i s'ha aproximat a una equació de segon grau per tal de poder definir la eficiència del bloc PSU (Taula 8.3).

Factor de càrrega(%)	Eficiència (%)
10	91,12
20	93,48
50	94,83
100	93,38

Taula 8.3. Dades de partida conegudes Factor de càrrega (%) vs. Eficiència (%).²³

²³ Font: https://plugloadsolutions.com/psu_reports/LENOVO_FSG023_750W_SO-1254_Report.pdf

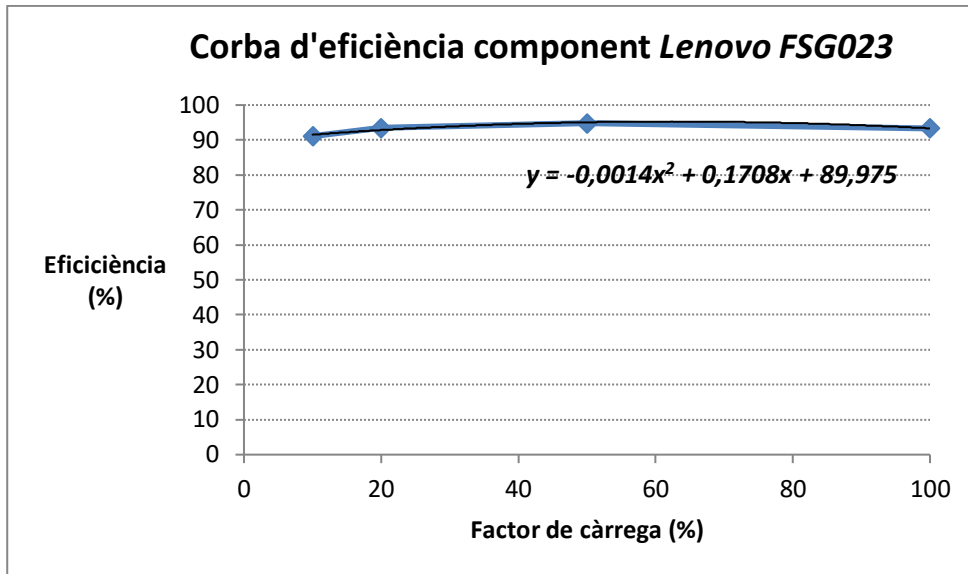


Figura 8.2. Corba d'eficiència del component inversor *Lenovo FSG023*.

Així doncs, coneixent la relació entre el factor de càrrega i la eficiència del component, que es pot aproximar segons l'equació de segon grau $ef(\%) = -0.0014 \cdot FC^2 + 0.1708 \cdot FC + 89.975$ (Figura 8.2.), es podrà calcular la potència que ha d'arribar al PSU per tal de, considerant la ineficiència del component, garantir una certa potència a la càrrega (Figura 8.3.).

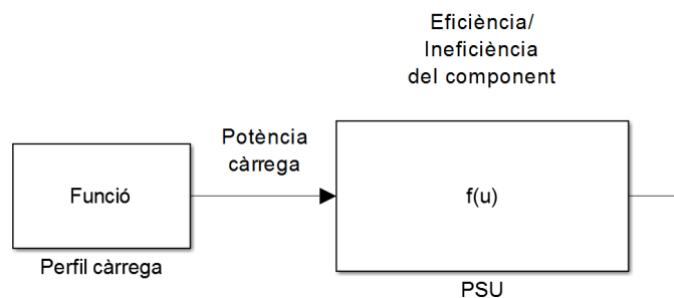


Figura 8.3. Diagrama de blocs amb Simulink de referència a contra flux.

Per tal de anar construint el model de disseny elèctric en Simulink, s'haurà de definir la funció $f(u)$ del bloc PSU. Aquesta funció serà:

$$f(u) = P_{sortida\ del\ PSU} = \frac{P_{entrada\ al\ PSU}}{eficiència_{inversor}} \quad (\text{Eq. 8.2.})$$

$$f(u) = \frac{u(1)}{\left\{ \frac{-0.0014 * \left[\frac{u(1)}{P_{nom}} \right]^2 + 0.1708 * \left[\frac{u(1)}{P_{nom}} \right] + 89.975}{100} \right\}} \quad (\text{Eq. 8.3.})$$

On,

- $f(u)$ és la potència de sortida del PSU que considera la eficiència del component que realitza la conversió CA/DC escollit.
- $u(1)$ és el valor de potència a l'entrada del bloc PSU, és a dir, la sortida del bloc perfil de càrrega. Serà la potència de la càrrega en un instant donat ja que segueix un perfil.
- $FC = \frac{u(1)}{P_{nom}}$ és el factor de càrrega de la potència de la càrrega i equival a la potència que arriba la càrrega respecte a la potència nominal.

Aleshores, la sortida del bloc serà directament el valor que doni $f(u)$, és a dir la potència que ha d'arribar al PSU per tal de, considerant la ineficiència del component, es garanteixi una certa potència a la càrrega.

8.1.3. Bloc Cable

El bloc cable que va a continuació del bloc PSU està creat per considerar les pèrdues del cable des del bloc PSU fins al següent bloc. Aquest bloc tindrà per funció trobar les pèrdues del cable per tal de trobar la potència que surt del bloc SAI (el següent bloc del diagrama a contra flux).

Es coneix que les pèrdues del cable depenen de la intensitat que circula per ell i de la resistència que aquest oposa al pas del corrent. Així:

$$Perdues \text{ cable} = I^2 * R \quad (\text{Eq. 8.4.})$$

On:

- I és la intensitat que circula pel cable.
- R es la resistència que oposa el cable al pas del corrent.

Per tal de definir la resistència, paràmetre fins ara desconegut, s'aplicarà la fórmula:

$$R = \frac{\rho * l}{S} \quad (\text{Eq. 8.5.})$$

On:

- R serà la resistència del cable en ohms.
- ρ és la resistivitat del coure i pren un valor de 0,0172 Ohm·mm²/m.
- l és la longitud del tram de cable en m.
- S és la secció transversal del cable en mm².

A l'hora de calcular aquesta resistència, per una banda, per tal de trobar els valors de l , que seran valors aproximats, es partir del plànol de la planta facilitat pel BSC (que no es pot mostrar per acords de confidencialitat) en què, coneixent l'escala, es podrà deduir una distancia aproximada de cables des d'una sortida del UPS fins al servidor. Per altra banda, els valors de secció S de cadascun dels cables que uneixen cada component, s'extrauran dels plànols de sistemes elèctrics també facilitats pels tècnics del BSC.

Per al model elèctric del sistema actual del centre de dades, hi ha dos trams de cable, el primer que va des de el SAI fins al PSU (que es considera ubicat amb la càrrega sense cable entremig) i el segon que va des de la xarxa fins al SAI. En canvi, per al model optimitzat que es proposa, es considera un únic tram de cable que va des de la xarxa fins al PSU ubicat amb la càrrega sense cable entremig. Els trams de cable aproximats deduïts, les seccions de cada tram de cable i, en funció d'aquests, els valors obtinguts de resistència queden recollits a la Taula 8.4.

Tram		Secció S [mm ²]	Longitud l [m]	Resistència R [ohms]
Cable 1	Línia Q2	96 (6 mm ² x 16 línies)	20	0,00358333
	Línia Q6	96 (6 mm ² x 16 línies)	20	0,00358333
Cable 2	Connexió a T1	120	20	0,0028666

Taula 8.4. Càlcul de la resistència dels cables a considerar en l'estudi.

Per tal de definir la intensitat que circula pel cable, s'aplicarà la fórmula:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} * V * \cos \gamma} \quad (\text{Eq. 8.6.})$$

On:

- I és la intensitat que circula pel cable.
- P és la potència que arriba al PSU.
- V és el voltatge de línia que arriba al PSU que val 400 V.

- $\cos \gamma$ és el factor de potència i que pren un valor d'1 al ser corregit el factor de potència al sortir del SAI/UPS.

Conegudes les expressions de R i I i sabent que les pèrdues del tram de cable queden completament definides amb aquests dos paràmetres, la funció del bloc cable serà aquella que doni el valor de la sortida del bloc, és a dir, la potència que ha de sortir del bloc anterior al cable per, considerant les pèrdues, donar una determinada potència a la sortida.

$$f(u) = u(1) + Pèrdues_{cable} \quad (\text{Eq. 8.7.})$$

$$f(u) = u(1) + \left[\left(\frac{u(1)}{\sqrt{3} * V * \cos \gamma} \right)^2 * \left(\frac{\rho * l}{S} \right) \right] \quad (\text{Eq. 8.8.})$$

On:

- $f(u)$ és la sortida del bloc cable.
- $u(1)$ és l'entrada del bloc cable.
- $\left[\left(\frac{u(1)}{\sqrt{3} * V * \cos \gamma} \right)^2 * \left(\frac{\rho * l}{S} \right) \right]$ són les pèrdues del cable en un determinat tram d'instal·lació.

8.1.4. Bloc UPS

El bloc UPS és el que vol representar el component encarregat de donar suport, únicament en algunes de les línies, a la xarxa d'alimentació principal en un possible tall del subministrament elèctric. Aquest bloc es trobarà únicament en el model del sistema elèctric del centre de dades actual, ja que el model optimitzat no considera aquestes transformacions.

En aquest component es dona una primera transformació al rectificador en que el corrent altern provinent de la xarxa és transformada en corrent contínua per carregar un banc de bateries i una segona transformació a l'inversor en què el corrent continu prèviament transformat es torna a passar a corrent altern per fer-lo arribar fins la càrrega.

Com s'ha comentat, el model que tenen de UPS al centre de dades és conegut i, per aquesta raó, és fàcilment adquirible el perfil d'eficiència del component en funció del factor de càrrega. A més, també s'ha comentat que, en funcionament normal sense incidències, existeixen dos tipus de modes de funcionament: el mode *Energy Save System* i el mode de *Doble conversió*.

A continuació es mostra la corba d'eficiència extreta de la guia del consumidor [15], en què

es pot observar com per a càrregues superiors al 25% l'eficiència segueix una tendència lineal, sent del 99% en el mode *Energy Save System* i del 97% en el mode de *Doble conversió*.

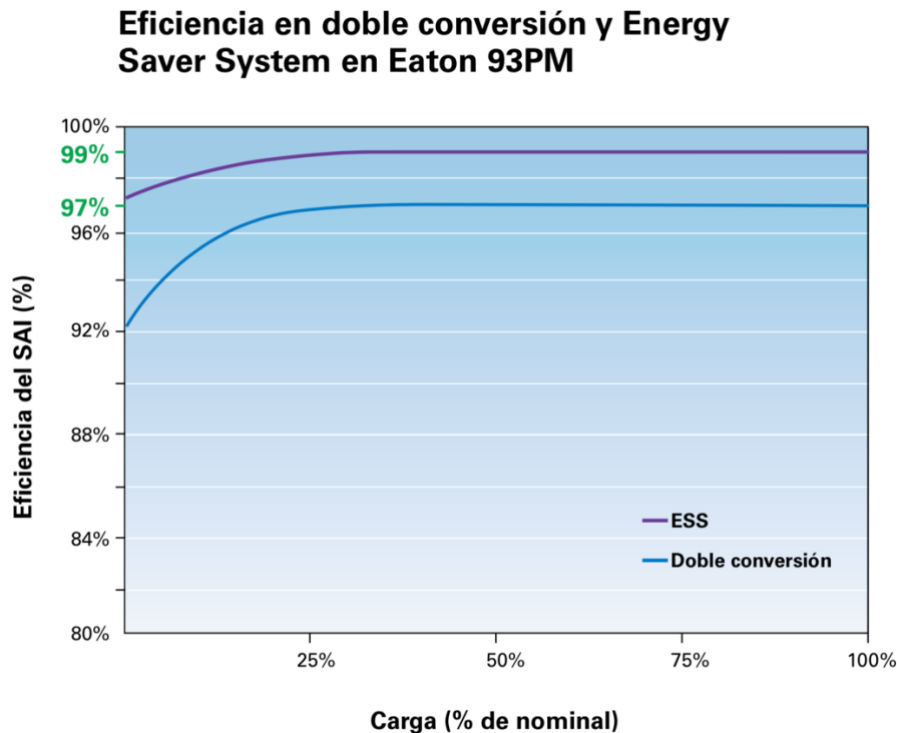


Figura 8.4. Corba d'eficiència del SAI de Eaton 93PM respecte a la càrrega.²⁴

Com es pot observar a la Figura 8.4., els valors d'eficiència són bastant alts per als dos modes de funcionament però al treballar a càrregues tant elevades, eficiències així, tot i ser altes, provoquen pèrdues de potència que podrien millorar-se notablement.

Tot i això, segons dades facilitades des del *Barcelona Supercomputing Center*, es coneix que el mode de funcionament *ESS* no és utilitzat al no donar fiabilitat al centre i que, per tant, treballen sempre amb el mode de funcionament *Doble Conversió*.

Amb aquesta hipòtesi, es pot dir que la funció del bloc UPS serà la potència que ha de sortir d'aquest bloc, és a dir, la potència que segons el flux de potència normal ha d'entrar al UPS

²⁴ Font:

https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwitoaaEo6DYAhWDbRQKHXLmAzuQFggoMAA&url=http%3A%2F%2Flit.powerware.com%2Ffil_download.asp%3Ffile%3DCatalogo_Eaton_93PM_30200kW.pdf&usg=AOvVaw04eFrJlr9bCtsXqbKuzzIB

per tal de subministrar una determinada potència a la càrrega. Així doncs, la funció serà:

$$f(u) = \frac{u(1)}{\text{eficiència del UPS}} = \frac{u(1)}{0,97} \quad (\text{Eq. 8.9.})$$

On:

- $u(1)$ és la potència d'entrada al bloc UPS, és a dir, la potència que realment ha de sortir del UPS considerant la ineficiència del component.
- 0,97 és l'eficiència del UPS considerant que està treballant en el mode doble conversió.

8.1.5. Bloc Transformador

El bloc transformador fa referència a un dels tres transformadors que existeixen dintre del sistema elèctric del centre de dades. Aquest, vindrà caracteritzat per una eficiència o rendiment que segons la norma EN 50541-1:2011 o també UNE-EN 50541-1:2012 segueix l'equació:

$$\eta = \frac{\alpha \cdot S}{\alpha \cdot S + P_0 + \alpha^2 \cdot P_k} \quad (\text{Eq. 8.10.})$$

On:

- α és el factor de càrrega.
- P_0 és la pèrdua en buit del ferro.
- P_k són les pèrdues del coure en condicions nominals.

El factor de càrrega α segueix l'equació:

$$\alpha = \frac{I_1}{I_{N1}} \cong \frac{S_1}{S_{N1}} \quad (\text{Eq. 8.11.})$$

On:

- I_1 és la intensitat que circula pel primari.
- I_{N1} és la intensitat nominal del primari.
- S_1 és la potència que circula pel primari.
- S_{N1} és la potència nominal del primari.

Per una banda, per trobar el corrent que circula pel primari, se sap que:

$$I_1 = \frac{I_2}{r_t} \quad (\text{Eq. 8.12.})$$

On:

$r_t = \frac{U_{N1}}{U_{N2}}$ sent U_{N1} i U_{N2} la tensió nominal del primari i del secundari respectivament. Sent $U_{N1} = 25 \text{ kV}$ i $U_{N2} = 400 \text{ V}$, es pot calcular com $r_t = \frac{U_{N1}}{U_{N2}} = \frac{25000}{400} = 62,5$ (mateixa per als tres transformadors).

El corrent que circula pel secundari I_2 és, donat que la càrrega és el consum del centre de dades en bornes del UPS i com aquesta treballa amb factor de potència unitari, el corrent del secundari es pot trobar com:

$$I_2 = \frac{P_{\text{càrrega}}}{\sqrt{3} * V_2} \quad (\text{Eq. 8.13.})$$

On:

- $P_{\text{càrrega}}$ és la potència del centre de dades en bornes del UPS, també és el valor d'entrada al bloc transformador $u(1)$.
- V_2 és el voltatge que circula pel secundari i s'assumeix que val la tensió nominal de **400 V**.

Per altra banda, per trobar el corrent nominal del primari, s'aplica la fórmula:

$$I_{N1} = \frac{S_{N1}}{\sqrt{3} \cdot U_{N1}} = \frac{2000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 25 \text{ kV}} = 46.188 \text{ A (T1 i T2)} \quad (\text{Eq. 8.14.})$$

$$I_{N1} = \frac{S_{N1}}{\sqrt{3} \cdot U_{N1}} = \frac{1000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 25 \text{ kV}} = 23.094 \text{ A (T3)} \quad (\text{Eq. 8.15.})$$

Aleshores, amb les equacions comentades anteriorment, es dedueix que el factor de càrrega α serà un paràmetre que serà funció de la potència en bornes del UPS, és a dir, de la potència d'entrada al bloc transformador $u(1)$. A més, I_{N1} serà un valor conegut (calculat anteriorment) que no serà igual en els tres transformadors.

$$\alpha = \frac{P_{\text{càrrega}}}{\sqrt{3} * 400 * 62.5 * I_{N1}} \quad (\text{Eq. 8.16.})$$

Donat que hi ha dos transformadors diferents a modelitzar, a partir de la informació extreta del manual tècnic de transformadors com els instal·lats al *Barcelona Supercomputing Center* [17], s'han pogut obtenir els valors de P_0 i de P_k que es recullen a la Taula 8.5.

Transformador	Potència S [kVA]	P_0 [W]	P_k [W]
T1 o T3	2000	2600	16000
T2	1000	1550	9000

Taula 8.5. Valors de P_0 i P_k per als transformadors del centre de supercomputació.

La sortida del bloc transformador haurà de ser aquella potència que ha de subministrar la xarxa per tal que, considerant les ineficiències de cada component de la instal·lació, a la càrrega arribi una potència fixada coneguda. Aleshores, sabent el rendiment del component, la funció del bloc transformador haurà de ser:

$$f(u) = \frac{u(1)}{\eta} = \frac{u(1)}{\left[\frac{\alpha \cdot S}{\alpha \cdot S + P_0 + \alpha^2 \cdot P_k} \right]} \quad (\text{Eq. 8.17.})$$

On els paràmetres S , P_0 i P_k estan definits (Taula 8.5) per als dos tipus diferents de transformadors, $u(1)$ és l'entrada del bloc transformador i finalment α és un paràmetre que depèn de l'entrada $u(1)$.

8.2. Càlculs i resultats obtinguts

Realitzada la modelització de tots els blocs, s'estudien les 2 línies que es volen optimitzar, aquelles en què existeixen sistemes d'alimentació d'emergència (UPS). Els sistemes d'alimentació d'emergència són els que s'ha considerat que afecten a la ineficiència de les línies amb la realització de dues etapes de transformació d'energia que no són estrictament necessàries.

Per poder dur a terme els càlculs d'eficiència, s'ha utilitzat el programari Matlab, específicament utilitzant la llibreria de Simulink, per tal de poder crear els blocs que defineixen l'ineficiència de cadascun dels elements que formen part del model elèctric.

A continuació es mostren els models Simulink del disseny elèctric actual (Figura 8.5) i del disseny elèctric proposat (Figura 8.6) en què es poden observar els blocs que defineixen el model, cada un representat per les fórmules extretes de l'apartat anterior.

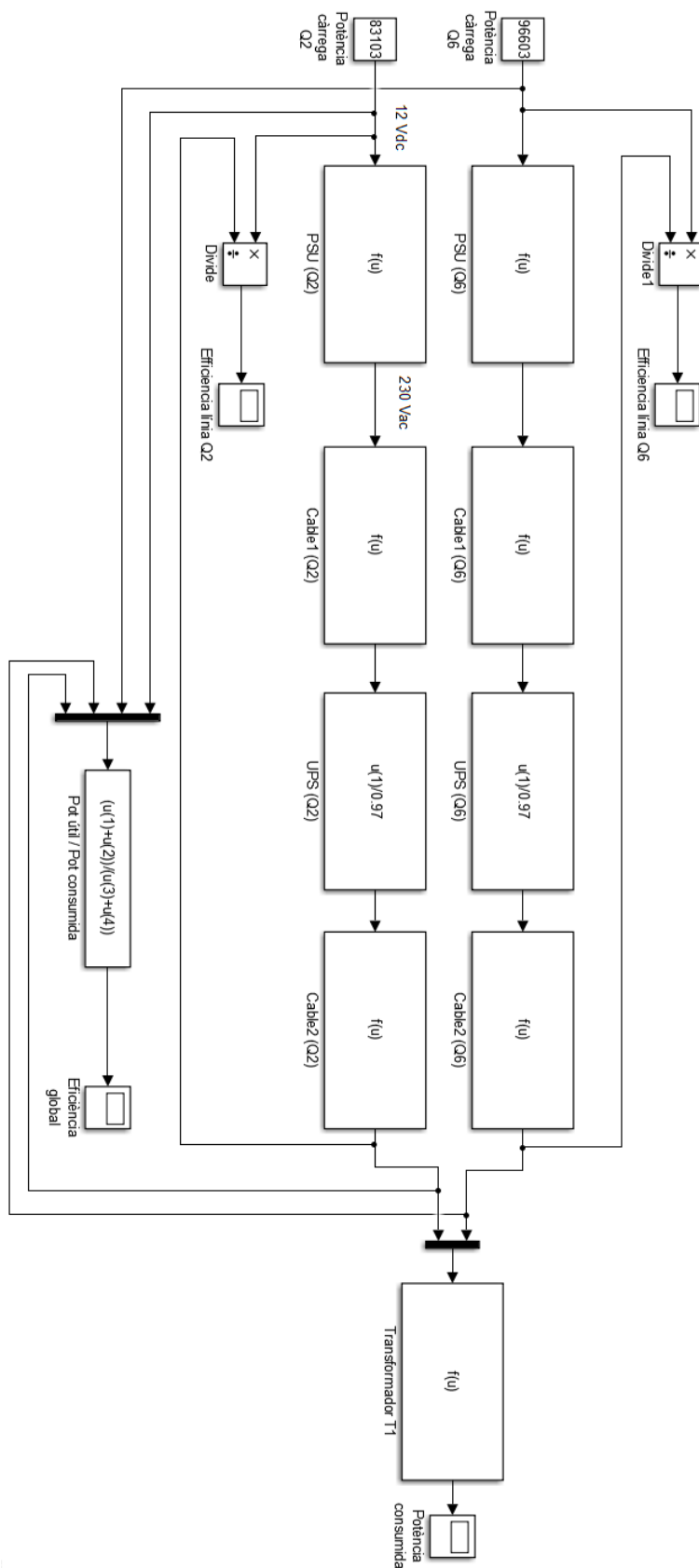


Figura 8.5. Esquema Simulink del disseny elèctric actual.

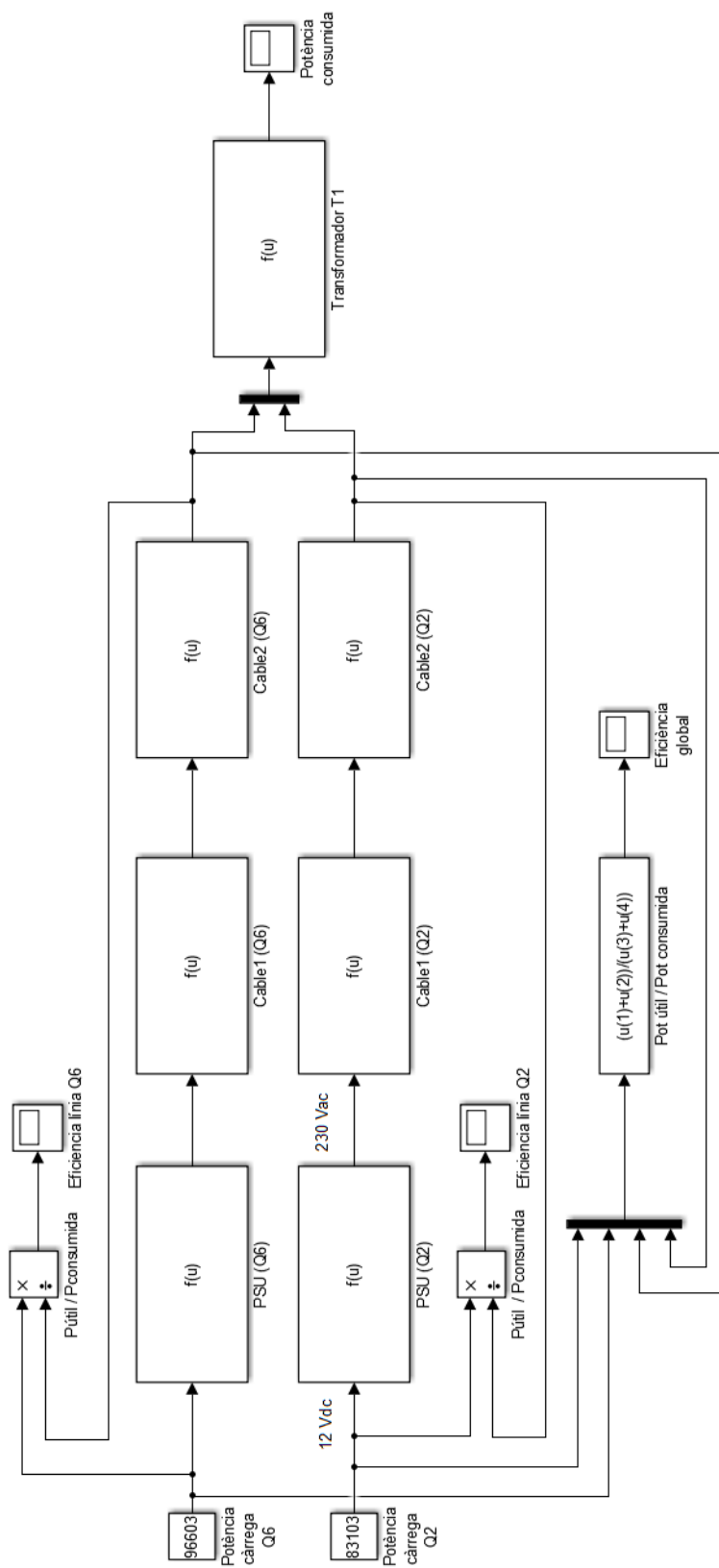


Figura 8.6. Esquema Simulink del disseny elèctric optimitzat.

L'eficiència, com es mostra a les figures anteriors, s'ha calculat com el sumatori de les potències útils respecte el sumatori de les potències consumides de les línies:

$$\eta_{línia} = \frac{P_{útil}}{P_{consumida}} \quad (\text{Eq. 8.18.})$$

$$\eta_{global \text{ línies}} = \frac{\sum P_{útil}}{\sum P_{consumides}} \quad (\text{Eq. 8.19.})$$

Un cop simulat cadascun dels models, a la Taula 8.6. es recullen els resultats obtinguts per a un factor de càrrega de 1, és a dir, si el sistema treballa a la potència nominal a la càrrega.

	Pot. línia Q2 [W]		Pot. línia Q6 [W]		Eficiència línia		Eficiència global
	Útil	Consumida	Útil	Consumida	Q2	Q6	
Model actual	83103	95040	96603	11050	0.8744	0.8744	0.8744
Model optimitzat	83103	92190	96603	10720	0.9014	0.9014	0.9014

Taula 8.6. Recull de resultat de les simulacions.

Tot i ser valor d'eficiències globals bastant elevats, quan es parlen de potències tant elevades, la correcció d'un 2.7% de l'eficiència suposa beneficis, tant econòmics com energètics, molt importants. Per aquesta raó, també s'ha considerat convenient mostrar la diferència de potències consumides d'aquestes dues línies amb la distribució elèctrica actual i la que es proposa un cop tinguda en compte l'eficiència del transformador. Aquests resultats es mostren a la Taula 8.7.

	Potència consumida [W]
Model actual	208100
Model optimitzat	202000

Taula 8.7. Potències consumides totals model actual vs. Optimitzat amb un FC=1.

Per poder aproximar-se més a la realitat, s'aplicarà un factor de càrrega mig del 80% que considera les possibles parades per tal de realitzar manteniment, les hores o dies en què no

s'està treballant a plena càrrega, entre d'altres. Amb aquesta idea, s'obtenen les potències mostrades a continuació a la Taula 8.7.

	Potència consumida [W]
Model actual	167100
Model optimitzat	162100

Taula 8.8. Potències consumides totals model actual vs. Optimitzat amb un FC=0.8.

8.3. Conclusions

D'aquest estudi tècnic, la valoració final és molt positiva. Com s'havia previst, el canvi del model actual, amb unitats de suport de l'energia elèctrica de la xarxa, cap a un nou model amb bateries distribuïdes als servidors ha donat lloc a una millora molt important de l'eficiència global del sistema elèctric.

Tot i que només siguin dues línies les que actualment disposen de SAI's, les potències que circulen son bastant elevades fent que, amb aquesta proposta, es puguin deixar de gastar uns aproximadament 6000 W si es dóna la potència nominal a la càrrega o uns 5000 W, com s'observa a la Taula 8.8, amb un factor de càrrega del 80%. Aquesta potència que es podria deixar de consumir, considerant les hores de consum que hi ha en un any, ens podria donar la informació de la quantitat d'energia que es podria estalviar en un any (43800 kWh).

9. Anàlisi econòmic

A continuació es mostra l'estudi econòmic que tracta de comparar o avaluar els beneficis que suposa la proposta d'optimització que es planteja. Per tal de poder calcular econòmicament els beneficis d'aquesta millora energètica, es plantegen 3 possibles estudis econòmics.

Per una banda, donat que els consums elèctrics del model actual i del optimitzat són valors coneguts gràcies a les simulacions realitzades, es poden calcular els beneficis econòmics derivats de l'estalvi d'energia.

Per altra banda, s'aplicarà un model de costos amb el que es volen comparar els dos sistemes d'emmagatzematge, ja que la proposta també inclou el canvi del sistema d'emmagatzematge del centre de dades.

9.1. Estalvi econòmic

Coneixent les potències consumides per les dues línies que s'estan estudiant amb un factor de càrrega mig d'un 80% al llarg de l'any que inclou totes les possibles afectacions i donat un preu del kWh donat, es pot calcular la quantitat de diners que s'estalviarien en un any dintre d'aquesta hipòtesi.

$$5000 \text{ W} \cdot \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}} \cdot \frac{365 \text{ dies}}{1 \text{ any}} \cdot \frac{24 \text{ hores}}{1 \text{ dia}} \cdot \frac{0,15 \text{ €}}{1 \text{ kWh}} = 6570 \text{ €/any d'estalvi}$$

Aquest indicador d'estalvi però, dona una idea de la quantitat de diners que es podrien deixar de gastar però és un indicador poc precís ja que no contempla els costos derivats de la utilització del producte. Per aquesta raó, es planteja dur a terme un estudi econòmic més ampli en què poder quantificar el preu de l'energia derivat de l'ús de cadascuna de les tecnologies comparades, el que s'ha anomenat model de costos.

9.2. Model de costos

L'anàlisi econòmic de la solució proposada mitjançant el model de costos consisteix en l'estudi dels costos globals de la instal·lació que es vol implantar en comparació amb els costos globals de la instal·lació que està en funcionament actualment.

Per tal d'analitzar els costos globals, s'estudiarà un indicador anomenat LCOE (*Levelized Cost of Energy*) o costos anivellats de l'energia, que s'utilitza per comparar els costos unitaris al llarg de la vida útil del producte en condicions d'estabilitat del preu de l'energia i

assumint uns valors de costos de producció estipulats. En aquest indicador s'hi recullen tant els costos d'inversió, els costos d'explotació i manteniment, i els costos de finalització de la vida útil del producte. Per aquesta raó, tot i que hi ha paràmetres que únicament depenen de la bateria, s'han d'incloure els costos d'inversió de tots els components de la línia (inversors i convertidors).

Els costos anivellats de l'energia o LCOE es coneixen com la quantitat de diners que costen els kWany:

$$LCOE = \frac{\text{Costos totals anuals}}{N^{\circ} \frac{\text{hores}}{\text{dia}} \cdot N^{\circ} \frac{\text{dies}}{\text{any}} \text{ de funcionament}} \quad (\text{Eq. 8.20.})$$

On els costos totals anuals es calculen com el sumatori de:

- Despeses anuals de la inversió inicial
- Despeses anuals dels costos fixos d'operació i manteniment
- Despeses anuals dels costos variables d'operació i manteniment
- Despeses anuals del recanvi de components
- Despeses anuals dels costos de final de vida útil del projecte

És interessant comentar que, el LCOE que es vol calcular no és el que representa els costos de funcionament del centre de dades, sinó els costos derivats de la utilització eventual del sistema d'emmagatzematge. Com que la alternativa proposada funciona en el cas que sigui necessària la seva utilització, els càlculs realitzats per al model actual també estan basats en la idea que els SAI treballen únicament quan és estrictament necessari. Amb aquest càlcul, per tant, també es podrà valorar i quantificar el preu que suposa per a un centre de dades disposar d'aquestes unitats d'emmagatzematge.

El model de costos i la seva formulació es pot consultar al llibre *Energy storage in Power Systems* [18].

9.2.1. Definició dels paràmetres del model

El SAI de Eaton 93PM, l'actualment està instal·lat al centre de dades, té bateries de tipus VRLA (Valve Regulated Lead-Acid battery), unes bateries de plom i àcid regulades per vàlvula que són de les més comercials a nivell mundial i, per tant, tenen menors costos d'inversió. En canvi, amb la proposta de millora s'ha plantejat l'ús de bateries de liti que són bateries menys comercialitzades però que actualment estan millorant en l'aspecte econòmic, d'alt rendiment i alta qualitat a més de la seva elevada densitat d'energia, és a dir, que acumulen molta més càrrega per unitat de pes i volum.

Una vegada escollida la tipologia de bateries a emprar al sistema proposat optimitzat, és

hora de procedir al càlcul de tots aquells paràmetres que definiran el LCOE de cadascun dels sistemes d'emmagatzematge.

9.2.1.1. Capacitat d'emmagatzematge de la bateria

El primer paràmetre necessari per al càlcul del LCOE, correspon a la capacitat d'emmagatzematge de la bateria (sense considerar les pèrdues ni la profunditat de descàrrega). Aquest paràmetre ve fixat per les característiques del SAI que tenen instal·lat al centre de dades. Es coneix que cada SAI té una potència de 120 kW i autonomia de 12 min, per tant, es considera que la capacitat d'emmagatzematge de la bateria serà:

$$120 \text{ kW} \cdot 12 \text{ min} \cdot \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ min}} = 24 \text{ kWh}$$

Aquest valor, serà el mateix per als dos models que es plantegen ja que es vol un sistema d'emmagatzematge local d'energia capaç d'aportar aquesta capacitat d'emmagatzematge.

9.2.1.2. Capacitat de potència del sistema de conversió d'energia

En quant al segon paràmetre, queda definit també per les característiques del SAI que tenen instal·lat al centre de dades actualment. La capacitat de potència del sistema de conversió d'energia correspon a la potència del UPS, que té un valor de 120 kW i que es voldrà mantenir en el sistema d'emmagatzematge distribuït.

9.2.1.3. Cost específic per unitat de capacitat d'emmagatzematge d'energia

El cost específic per unitat de capacitat d'emmagatzematge d'energia és un paràmetre que depèn del material de la bateria i, per tant, serà diferent per als dos sistemes d'emmagatzematge. Per al seu càlcul, s'han buscat bateries comercials [19] en què coneixent la capacitat en Ah (ampers-hora) i el voltatge en V (volts) es pot conèixer l'energia en Wh (watts-hora) i coneixent el seu preu, es pot deduir el preu del kWh. És a dir:

Per a una bateria de plom-àcid (tipus gel) comercial en què es coneixen la seva capacitat, voltatge i preu:

- C = 60 Ah
- V = 12 V
- P = 151,40 €

Es pot calcular el cost específic per unitat de capacitat d'emmagatzematge d'energia com:

$$\frac{151,40 \text{ €}}{60 \text{ Ah} \cdot 12 \text{ V} \cdot \frac{1 \text{ kWh}}{1000 \text{ Wh}}} = 210,3 \text{ €/kWh}$$

De la mateixa manera, per a una bateria de liti comercial en què es coneixen la seva capacitat, voltatge i preu:

- C = 18,5 Ah
- V = 12,8 V
- P = 188,05 €

Es pot calcular el cost específic per unitat de capacitat d'emmagatzematge d'energia com:

$$\frac{188,05 \text{ €}}{18,5 \text{ Ah} \cdot 12,8 \text{ V} \cdot \frac{1 \text{ kWh}}{1000 \text{ Wh}}} = 794,1 \text{ €/kWh}$$

Amb aquests valors, que son representatius de les bateries instal·lades o a instal·lar, queda definit el tercer paràmetre.

9.2.1.4. Cost específic per unitat de capacitat de potència

A continuació, cal definir els costos específics per unitat de potència, que representen els costos d'inversió de tots els components que conformen el sistema d'emmagatzematge. Amb el model elèctric de cadascuna de les alternatives plantejat anteriorment (Figura 8.5 i Figura 8.6), s'analitzaran els components elèctrics que intervenen en el sistema d'emmagatzematge. Cal matisar que els costos d'inversió dels PSU no es consideraran en el càlcul d'aquest paràmetre ja que són components inclosos a les dues opcions i que no només tenen a veure amb el sistema d'emmagatzematge, incloure el seus costos associats distorsionaria el càlcul del LCOE.

En el cas del model elèctric actual, com es pot observar a la Figura 7.1, existeixen dues etapes de transformació (si no s'inclouen les del PSU): AC/DC l'inversor i DC/DC al convertidor. Per tant, caldrà definir el cost del kWh per a cada component. A partir de preus de convertidors comercials [19], s'han obtingut aquests valors:

Per a l'inversor AC/DC:

$$\frac{98,89 \text{ €}}{200 \text{ W}} \cdot \frac{1000 \text{ W}}{1 \text{ kW}} = 494,45 \text{ €/kW}$$

Per al convertidor DC/DC:

$$\frac{129,59 \text{ €}}{280 \text{ W}} \cdot \frac{1000 \text{ W}}{1 \text{ kW}} = 462,82 \text{ €/kW}$$

En el cas del model optimitzat, que es pot observar a la Figura 7.3, només conté el bloc PSU en el que es realitzen dues transformacions que no seran considerades en aquest paràmetre. Per tant, no hi ha cap component addicional a contemplar.

9.2.1.5. Cost específic fix d'operació i manteniment

El cost fix d'operació i manteniment és un paràmetre que s'ha extret d'un treball realitzat a La universitat de Sevilla [21], en què es consideren uns valors de aproximadament 2 €/kWh per a les bateries de plom i àcid i uns aproximadament 3 €/kWh per a les bateries de liti.

9.2.1.6. Cost específic de l'electricitat

S'ha considerat un preu fix de l'electricitat de 15 cèntims d'euro per kWh [20].

9.2.1.7. Hores en funcionament diàries i dies en funcionament anuals

Es considera que cada mes es poden utilitzar els sistemes d'emmagatzematge 16h aproximadament, hores en les que per alguna raó s'han hagut d'activar. Amb aquesta hipòtesi, es poden calcular les hores de funcionament diàries i els dies de funcionament anuals necessaris per al càlcul del LCOE com:

$$16 \frac{h}{mes} \cdot \frac{1 mes}{30 dies} = 0,5333 h/dia$$

$$16 \frac{hora}{mes} \cdot \frac{12 mesos}{1 any} \cdot \frac{1 dia}{24 hores} = 8 dies/any$$

9.2.1.8. Eficiència d'anada i tornada

Aquest paràmetre defineix la quantitat d'energia que es pot extreure d'una bateria com un percentatge de la quantitat d'energia que s'ha necessitat per emmagatzemar-la. Aquesta pèrdua d'energia pot ser deguda del despreniment de calor o altres ineficiències dintre del sistema. A partir de les dades recollides d'un treball realitzat a La universitat de Sevilla [21], s'ha considerat per a la realització del càlcul del LCOE uns valors de 94% i 90% per a la màxima profunditat de descàrrega de les bateries de plom i àcid i les de liti, respectivament.

9.2.1.9. Màxima profunditat de descàrrega

La màxima profunditat de descàrrega està relacionada amb el mínim estat de càrrega de la bateria o el percentatge de la bateria que s'ha utilitzat. A partir de les dades recollides d'un treball realitzat a La universitat de Sevilla [21], s'ha considerat per a la realització del càlcul del LCOE uns valors de 0,8 i 0,9 per a la màxima profunditat de descàrrega de les bateries de plom i àcid i les de liti, respectivament.

9.2.1.10. Horitzó del projecte

L'horitzó del projecte és un paràmetre molt important a considerar ja que contempla la vida útil del component en aquest període. Per als càlculs del LCOE s'ha considerat un horitzó

del projecte de 10 anys ja que aproximadament és el temps de vida útil de les bateries abans que necessitin recanvi.

9.2.1.11. Taula de paràmetres

Aquest indicador és complex de calcular i per això, a la següent taula es recullen els paràmetres necessaris per al seu càlcul, tant per la solució d'emmagatzemat actual com la que es planteja:

Paràmetre	Unitats	Bateries plom VRLA	Bateries liti
Capacitat d'emmagatzematge de la bateria (sense considerar les pèrdues ni la profunditat de descàrrega)	kWh	24	24
Capacitat de potència del Sistema de conversió d'energia	kW	120	120
Cost específic per unitat de capacitat d'emmagatzematge d'energia (depèn del material de la bateria)	€/kWh	210,3	794,1
Cost específic per unitat de capacitat de potència (costos dels altres components de la línia com inversors o convertidors)	€/kW	$494,45 + 462,82 = 957,27$	0
Cost específic fix d'operació i manteniment	€/kW	2	3
Cost específic de l'electricitat	c€/kWh	15	15
Hores en funcionament diàries	hores	0,53333	0,53333
Dies en funcionament anuals	dies	8	8
Eficiència d'anada i tornada	p.u.	0,94	0,9
Màxima profunditat de descàrrega	p.u.	0,8	0,9
Horitzó del projecte	anys	10	10

Taula 9.1. Paràmetres a considerar per al càlcul del LCOE.

9.2.2. Resultats obtinguts

A partir dels paràmetres definits amb anterioritat s'han pogut obtenir uns valors de LCOE de 2.966,11 c€/kWh per a les bateries de plom i àcid i de 768,82 c€/kWh per al sistema d'emmagatzematge de bateries de liti. Es pot observar la gran diferència de valors que s'obtenen del paràmetre econòmic que contempla els costos al llarg de la vida útil dels dos

sistemes d'emmagatzematge estudiats.

9.3. Conclusions

Com a conclusió de l'estudi econòmic es pot valorar viable l'alternativa proposada al sistema d'emmagatzematge de bateries utilitzat actualment al centre de dades Mare Nostrum. En primer lloc, amb el primer càlcul genèric aproximat de la quantitat de diners estalviats derivats del estalvi de consum elèctric es pot valorar viable l'alternativa obtenint uns resultats d'estalvi anual molt satisfactoris.

En segon lloc, després d'aplicar el model de costos per poder calcular el paràmetre LCOE, s'ha pogut observar la gran diferencia de preu del kWh que suposa l'ús d'un sistema d'emmagatzematge i l'altre i, per tant, es demostra un altre vegada que el preu del sistema d'emmagatzematge proposat millora respecte al sistema actual. Tot i així, és interessant remarcar la gran quantitat de diners que suposa pel centre de dades disposar d'aquests sistemes d'alimentació de suport a la xarxa que tant de tant en tant s'utilitzen.

Conclusions

El principal objectiu d'aquest projecte era la recerca d'una alternativa viable a aplicar al centre de dades Mare Nostrum que millores l'eficiència energètica global del centre al tenir els centres de dades una gran contribució sobre el consum global del planeta.

La proposta que s'ha plantejat consisteix en el canvi subtil de grans bancs de bateries, que s'utilitzen com a suport a la xarxa elèctrica, per bateries més petites distribuïdes als servidors els quals cal protegir enfront possibles microtalls o alteracions de la senyal provinent de la xarxa.

El canvi proposat implica la reducció de dues etapes de transformació de potència que actualment es donen exclusivament per tal de convertir el corrent altern provinent de la xarxa a corrent continu per tal de poder carregar les bateries de suport. El sistema elèctric plantejat elimina aquestes dues etapes de transformació i reaprofitja el corrent ja transformat que alimenta els servidors en corrent continu a baix voltatge per carregar les bateries distribuïdes.

A través d'un estudi tècnic que ha avaluat l'eficiència o ineficiència dels components del model elèctric actual del sistema i del model proposat, s'ha pogut avaluar que l'alternativa proposada millora significativament l'eficiència de les línies elèctriques optimitzades i suposa uns estalvis energètics importants.

Per complementar aquest estudi, també s'ha realitzat un estudi econòmic que ha inclòs un anàlisi dels beneficis derivats de l'estalvi en el consum d'energia i l'anàlisi d'un indicador d'eficiència dels sistemes d'emmagatzematge. Ambdós estudis han resultat satisfactoris indicant novament les millores, en aquest cas, econòmiques de la proposta d'optimització.

Amb aquests resultats, es pot concloure que l'idea plantejada per Microsoft és una alternativa a la distribució elèctrica convencional dels centres de dades viable, que podria valorar-se en altres centres per tal de reduir els alts consums que aquests suposen.

Agraïments

Agrair especialment al Francisco Díaz González, membre del Departament d'Enginyeria Elèctrica de la UPC i tutor d'aquest projecte, pels coneixements i experiència aportada al llarg de la realització d'aquest projecte i per la fàcil accessibilitat que sempre ha mostrat per tal de realitzar seguiments de la feina realitzada.

Agrair també al Sergi Girona Turell, Director d'Operacions del *Barcelona Supercomputing Center*, i al Miguel Armenta, Tècnic de Manteniment del *Barcelona Supercomputing Center*, per la seva atenció i disponibilitat per realitzar consultes i per la informació i coneixements aportats al llarg de la realització d'aquest treball.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] SADLER, R. (31 Gener, 2017) *Video Demand Drives up Global CO₂ Emissions* [<http://climatenewsnetwork.net/video-demand-drives-global-co2-emissions/>]
- [2] AVGERINOU, M., BERTOLDI, P. CASTELLAZZI, L. *Trends in Data Centre Energy Consumption under the European Code of Conduct for Data Centre Energy Efficiency*. [<http://www.mdpi.com/1996-1073/10/10/1470/htm#B15-energies-10>]
- [3] IEA COP21. [<http://www.iea.org/cop21/>]
- [4] UNFCCC. *ICT Helping Tackle Climate Change Could Help Cut Global Emissions 20% by 2030*. [<http://newsroom.unfccc.int/unfccc-newsroom/ict-sector-helping-to-tackle-climate-change/>]
- [5] BSC. [<https://www.bsc.es/ca/marenostrum/marenostrum>]
- [6] TIA. *TIA-942 Data Center Cabling Standard Amended*. [<http://www.tiaonline.org/news-media/news-articles/tia-942-data-center-cabling-standard-amended>]
- [7] INFORMATION TECHNOLOGY. *Data Center Utilization Report- Octover 2011*. [<https://commons.lbl.gov/pages/viewpage.action?pagelId=77826981>]
- [8] ROUSE, M. *The Green Gris Performance Indicator (PI)*. [<http://searchdatacenter.techtarget.com/definition/Performance-Indicator-PI>]
- [9] MICROSOFT. *Microsoft Reinvents Datacenter Power Backup with New Open Compute Project Specification*. [<https://cloudblogs.microsoft.com/hybridcloud/2015/03/10/microsoft-reinvents-datacenter-power-backup-with-new-open-compute-project-specification/>]
- [10] ERIC C. PETERSON, SHAUN L. HARRIS, CHRISTIAN L. BELADY, DARREN A. SHAKIB, SOMPONG PAUL OLARIG, FRANK J. WIRTZ. *Rack-Based Uninterruptible Power Supply*. [<https://www.google.es/patents/US20110304211>]
- [11] WILLIAM WHITTED, MONTGOMERY SYKORA, KEN KRIEGER, BENCHIAO JAI, WILLIAM HAMBURGEN, JIMMY CLIDARAS, DONALD L. BEATY, GERALD AIGNER. *Data center uninterruptible power distribution architecture*.

[https://www.google.es/patents/US7560831?dq=microsoft+data+center+batteries&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwi-sL_13ZrXAhWIMSYKHaZeAPwQ6AEIJzAA]

- [12] SELVER CORHODZIC, ANDREW B. CARLSON, WILLIAM H. WHITTED, MONTGOMERY SYKORA, KEN KRIEGER, WILLIAM HAMBURGEN, DONALD L. BEATY, GERALD AIGNER, JIMMY CLIDARAS. *Direct-coupled IT load*. [<https://www.google.es/patents/US8080900?dq=microsoft+data+center+batteries&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwi7zITd35rXAhXLWRQKHeUwCTc4FBD0AQhKMAQ>]

- [13] BSC. *Informació tècnica. Mare Nostrum*. [<https://www.bsc.es/ca/marenostrum/marenostrum/informacio-tecnica>]

- [14] DAVID WATTS. *Lenovo ThinkSystem SD530 Server. Product Guide*. [<https://lenovopress.com/lp0635-thinksystem-sd530-server>]

- [15] LENOVO FSG023. *80 PLUS Verification and Testing Report*. [https://plugloadsolutions.com/psu_reports/LENOVO_FSG023_750W_SO-1254_Report.pdf]

- [16] EATON. *Catálogo SAI Eaton 93PM 30-200 kW*. [https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwitoaaEo6DYAhWDbRQKHXLmAzUQFggoMAA&url=http%3A%2F%2Flit.powerware.com%2Ffil_download.asp%3Ffile%3DCatalogo_Eaton_93PM_30-200kW.pdf&usg=AOvVaw04eFrJlr9bCtsXqbKuzzIB]

- [17] [https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjz48aMILrYAhXGShQKHQkRB0MQFggoMAA&url=https%3A%2F%2Flibrary.e.abb.com%2Fpublic%2F6e8cd972d867464096a1232d50aed0b4%2F1LES100021ZD_technical%2520data%2520for%2520VCC_EN_Low.pdf&usg=AOvVaw0LKpGjLI8_FRkZLeX4gU7]

- [18] DIAZ GONZALEZ F, SUMPER A, GOMIS-BELLMUNT O. *Energy Storage in Power Systems*. ISBN: 978-1-118-97132-1

- [19] AUTOSOLAR. [<https://autosolar.es>]

- [20] REE. [<https://www.esios.ree.es/es>]

- [21] HERNANDEZ ROMERO, A. Análisis económico de un sistema de almacenamiento para la disminución de desvíos de producción en un parque eólico. [<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70692/fichero/10+Baterias+para+Almacenamiento+de+Energ%C3%ADa.pdf>]